



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Titulació:

Grado en Ingeniería de Tecnología y Diseño Textil

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela:

Escola Superior d'Enginyeria Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Alumna:

Olga Jaume Rodríguez

Título Trabajo Final de Grado:

Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras

Directores:

Ernest Bernat Masó

Francisco Javier Capdevila Juan

Convocatoria de entrega del Trabajo Final de Grado:

Ordinaria; Cuatrimestre de otoño 2019-2020

Fecha de entrega:

15 de enero del 2020

DOCUMENTO 1. MEMORIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍA Y DISEÑO
TEXTIL

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras

Autora:

Olga Jaume Rodríguez

Tutores:

Ernest Bernat Masó

Francisco Javier Capdevila Juan

Enero, 2020

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento a mi tutor Ernest Bernat Masó y a Virginia Dolores Mendizábal por toda la atención y el apoyo que me han brindado durante el proyecto, sin ellos difícilmente hubiera podido realizarlo.

Gracias a los dos departamentos que han colaborado en este proyecto, al LITEM por tantas horas de laboratorio y disposición mostrada durante el proceso, a Luis Enrique Mercedes, Lluís Gil, Borja Martínez y Paulino Gil. Al departamento de textil de la ESEIAAT, Mónica Ardanuy, Francisco Javier Capdevila, Carla González y Laura González.

También me gustaría aprovechar en los agradecimientos del proyecto final de grado poder alabar y mostrar mi gratitud a las personas que representan mis pilares, mi familia y amigas. Gracias, por apoyarme, escucharme y aconsejarme durante toda mi trayectoria académica.

RESUMEN

Este estudio busca comparar resultados mecánicos a partir de la fabricación y ensayo de materiales compuestos para el refuerzo de estructuras.

Se describirá en este proyecto el proceso experimental usado para la fabricación y ensayo de probetas de mallas textiles vegetales a partir de fibras de algodón, lino, cáñamo y sisal recubiertas de resina epoxi, bio-epoxi y resina de poliéster para su ensayo a tracción. A partir del ensayo de tracción se determinarán sus características mecánicas como su módulo de elasticidad, sus curvas de tensión-deformación, la carga máxima a la que se pueden ver sometidas y su máxima deformación.

Con las características mecánicas obtenidas se compararán los resultados entre las diferentes tipologías de malla para determinar que combinaciones son más adecuadas para el refuerzo de estructuras y obtienen mejores propiedades mecánicas.

En el estudio se concluye que, tanto la resina epoxi como bio-epoxi proporcionan rigidez a las mallas, aumentando el módulo elástico de las mallas. Tanto la resina epoxi como bio-epoxi influyen en las características mecánicas de las mallas de igual manera. Mientras que la resina de poliéster es más flexible y aumenta la deformación máxima de las mallas. Las mallas de lino son las que obtienen una tensión máxima en todos los casos y las que tienen mayor rigidez.

ABSTRACT

This study seeks to compare mechanical results from the manufacture and testing of composite materials for the reinforcement of structures.

This project will describe the experimental process used for the manufacture and testing of vegetal mesh specimens from cotton, flax, hemp and sisal fibers coated with epoxy resin, bio-epoxy and polyester resin for tensile testing. From the tensile test, its mechanical characteristics will be determined, such as its modulus of elasticity, its stress-strain curves, the maximum load to which they can be put through and their maximum deformation.

With the obtained mechanical characteristics, the results will be compared to determine which combinations are more suitable for the reinforcement of structures and obtain better mechanical properties.

The study concludes that both the epoxy and bio-epoxy resin provide stiffness to the meshes, increasing the elastic modulus of the meshes. Both epoxy and bio-epoxy resin influence the mechanical characteristics of meshes in the same way. While the polyester resin is more flexible increases the maximum deformation of the meshes. Linen meshes are those that obtain a maximum tension in all cases and those with greater stiffness.



DECLARACIÓN DE HONOR

Declaro que,

el trabajo de este Trabajo Final de Grado ha sido llevado a cabo completamente por mí misma,

ninguna parte de este Trabajo Final de Grado está extraído del trabajo de otras personas u obras darles crédito,

todas las referencias han sido correctamente citadas,

Estoy autorizada para hacer uso de la información relacionada con el grupo de investigación que proporciono en este documento.

Entiendo que una infracción de esta declaración me deja sujeta a las acciones disciplinarias previstas por la *Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTECH*.

Olga Jaume Rodríguez

Enero, 2020

Nombre de la estudiante

Firma

Fecha

Título del trabajo: Estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	3
Resumen.....	4
Abstract	5
Declaración de honor	6
Índice de figuras	9
Índice de tablas	11
Lista de abreviaciones	12
Capítulo 1: Introducción y desarrollo teórico	14
1.1. Introducción	14
1.1.1. Justificación	14
1.1.2. Objetivos	14
1.1.3. Alcance	15
1.1.4. Planificación del proyecto	15
1.1.5. Estructura del proyecto.....	16
1.2. Estado del arte	16
1.3. Seguridad y riesgos del laboratorio.....	21
1.4. Caracterización de los hilos.....	22
1.4.1. Algodón/Poliéster.....	22
1.4.1.1. Procedimiento análisis químico	27
1.4.2. Cáñamo	28
1.4.3. Lino	29
1.4.4. Sisal.....	31
1.5. Resinas de recubrimiento.....	34
1.5.1. Epoxi.....	34
1.5.2. Bio-epoxi.....	35
1.5.3. Resina de poliéster	36
1.5.4. Resina Epoxi para la preparación de la sujeción de las probetas	38
Capítulo 2: Desarrollo experimental	39
2.1. Preparación de las probetas.....	39

2.1.1.	Fabricación del telar	39
2.1.2.	Preparación de los tejidos	40
2.1.2.1.	Tejido de Algodón/Poliéster	42
2.1.2.2.	Tejidos de Cáñamo y Lino	42
2.1.2.3.	Tejido de Sisal	42
2.1.3.	Fase de recubrimiento	43
2.1.4.	Preparación de la sujeción	44
2.2.	Procedimiento del ensayo	46
Capítulo 3: Resultados y análisis		48
3.1.	Resultados experimentales	48
3.1.1.	Algodón/Poliéster con resina Epoxi	48
3.1.2.	Algodón/Poliéster con resina BioEpoxi	50
3.1.3.	Algodón/Poliéster con resina de Poliéster	52
3.1.4.	Cáñamo con resina Epoxi	54
3.1.5.	Cáñamo con resina BioEpoxi	56
3.1.6.	Cáñamo con resina de Poliéster	58
3.1.7.	Lino con resina Epoxi	59
3.1.8.	Lino con resina BioEpoxi	61
3.1.9.	Lino con resina de Poliéster	62
3.1.10.	Sisal con resina Epoxi	64
3.1.11.	Sisal con resina BioEpoxi	66
3.1.12.	Sisal con resina de Poliéster	67
3.2.	Clasificación de fallas	69
3.3.	Discusión y análisis de resultados	70
3.3.1.	Comparativa de resultados de algodón/poliéster	70
3.3.2.	Comparativa de resultados de cáñamo	73
3.3.3.	Comparativa de resultados de lino	75
3.3.4.	Comparativa de resultados de sisal	78
3.3.5.	Comparativa de resultados entre las resinas aplicadas	80
Capítulo 4: Consideraciones ambientales		84
Capítulo 5: Presupuesto		85
Capítulo 6: Conclusiones		86
Capítulo 7: Trabajo futuro		88
Bibliografía		89

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Aplicaciones de las fibras naturales [2]	19
Fig. 2: Hilos de algodón, cáñamo, lino y sisal usados en el proyecto.....	22
Fig. 3: Imagen realizada por el microscopio del hilo de algodón/poliéster	25
Fig. 4: Imagen realizada por el microscopio del hilo de algodón/poliéster	26
Fig. 5: Imagen realizada por el microscopio del hilo de cáñamo	28
Fig. 6: Imagen realizada por el microscopio del hilo de lino	30
Fig. 7: Imagen realizada por el microscopio de una fibra de sisal.....	31
Fig. 8: Resina epoxi MasterBrace P3500 y endurecedor MasterBrace SAT 4500	34
Fig. 9: Resina BioEpoxi ONE Epoxy y endurecedor ONF Hardener	35
Fig. 10: Resina de poliéster SILMAR SIL66BQ-249A y su catalizador BUTANOX M-50.....	36
Fig. 11: Resina de poliéster CRONOLITA 3015 ACTIVADA y su catalizador Mek Peroxide 0,1kg	37
Fig. 12: Resina epoxi resoltech 1200 y su endurecedor resoltech 1204	38
Fig. 13: Proceso de fabricación de mallas textiles de algodón.....	41
Fig. 14: Inserción de hilos de trama entre los hilos de urdimbre.....	41
Fig. 15: Configuración y ligado del tejido de algodón-poliéster [9]	42
Fig. 16: Configuración y ligado de los tejidos de cáñamo y lino [9]	42
Fig. 17: Configuración y ligado del tejido de sisal [9]	43
Fig. 18: Proceso de recubrimiento del tejido con resina.....	44
Fig. 19: Tiras de no tejido de fibra de vidrio.....	45
Fig. 20: Fabricación de FRP para la sujeción de las probetas.....	46
Fig. 21: Configuración del ensayo de tracción: malla de cáñamo.....	47
Fig. 22: Configuración del ensayo de tracción: malla de algodón.....	47
Fig. 23: Mallas tras el ensayo de tracción CO/PES-Epoxi tejido 2	48
Fig. 24: Mallas tras el ensayo de tracción CO/PES-Epoxi tejido 1	48
Fig. 25: Curvas tensión-deformación de CO/PES-Epoxi tejido 1	49
Fig. 26: Curvas tensión-deformación de CO/PES-Epoxi tejido 2	49
Fig. 27: Mallas tras el ensayo de tracción CO/PES-BioEpoxi tejido 1.....	50
Fig. 28: Mallas tras el ensayo de tracción CO/PES-BioEpoxi tejido 2	50
Fig. 29: Curvas tensión-deformación de CO/PES-BioEpoxi tejido 1	50
Fig. 30: Curvas tensión-deformación de CO/PES-BioEpoxi tejido 2	51
Fig. 31: Mallas tras el ensayo a tracción CO/PES-Poliéster tejido 1.....	52
Fig. 32: Mallas tras el ensayo a tracción CO/PES-Poliéster tejido 2.....	52
Fig. 33: Curvas tensión-deformación de CO/PES-Poliéster tejido 1.....	53
Fig. 34: Curvas de tensión-deformación de CO/PES-Poliéster tejido 2.....	53
Fig. 35: Mallas tras el ensayo de tracción HA-Epoxi tejido 1	54
Fig. 36: Mallas tras el ensayo de tracción HA-Epoxi tejido 2	54
Fig. 37: Curvas tensión-deformación de HA-Epoxi tejido 1.....	54
Fig. 38: Curvas de tensión-deformación de HA-Epoxi tejido 2.....	55
Fig. 39: Mallas tras el ensayo de tracción HA-BioEpoxi tejido 1	56
Fig. 40: Mallas tras el ensayo de tracción HA-BioEpoxi tejido 2	56

Fig. 41: Curvas tensión-deformación de HA-BioEpoxi tejido 1	56
Fig. 42: Curvas tensión-deformación de HA-BioEpoxi tejido 2	57
Fig. 43: Mallas tras el ensayo de tracción HA-Poliéster tejido 1	58
Fig. 44: Mallas tras el ensayo de tracción HA-Poliéster tejido 2	58
Fig. 45: Curvas tensión-deformación de HA-Poliéster tejido 1	58
Fig. 46: Curvas tensión-deformación de HA-Poliéster tejido 2	59
Fig. 47: Mallas tras el ensayo a tracción LI-Epoxi tejido 1	59
Fig. 48: Mallas tras el ensayo a tracción LI-Epoxi tejido 2	59
Fig. 49: Curvas tensión-deformación de LI-Epoxi tejido 1	60
Fig. 50: Curvas tensión-deformación de LI-Epoxi tejido 2	60
Fig. 51: Mallas tras el ensayo de tracción LI-BioEpoxi tejido 1	61
Fig. 52: Mallas tras el ensayo de tracción LI-BioEpoxi tejido 2	61
Fig. 53: Curvas tensión-deformación de LI-BioEpoxi tejido 1	61
Fig. 54: Curvas tensión-deformación LI-Epoxi tejido 2	62
Fig. 55: Mallas tras el ensayo de tracción LI-Poliéster tejido 1	62
Fig. 56: Mallas tras el ensayo de tracción LI-Poliéster tejido 2	62
Fig. 57: Curvas de tensión-deformación LI-Poliéster tejido 1	63
Fig. 58: Curvas tensión-deformación de LI-Poliéster tejido 2	63
Fig. 59: Mallas tras el ensayo de tracción SI-Epoxi tejido 1	64
Fig. 60: Mallas tras el ensayo de tracción SI-Epoxi tejido 2	64
Fig. 61: Curvas tensión-deformación de SI-Epoxi tejido 1	64
Fig. 62: Curvas tensión-deformación de SI-Epoxi tejido 2	65
Fig. 63: Mallas tras el ensayo de tracción SI-BioEpoxi tejido 2	66
Fig. 64: Mallas tras el ensayo de tracción SI-BioEpoxi tejido 1	66
Fig. 65: Curvas tensión-deformación de SI-BioEpoxi tejido 1	66
Fig. 66: Curvas de tensión-deformación de SI-BioEpoxi tejido 2	67
Fig. 67: Mallas tras el ensayo de tracción SI-Poliéster tejido 1	67
Fig. 68: Mallas tras el ensayo de tracción SI-Poliéster tejido 2	67
Fig. 69: Curvas tensión-deformación de SI-Poliéster tejido 1	68
Fig. 70: Curvas tensión-deformación de SI-Poliéster tejido 2	68
Fig. 71: Curvas tensión-deformación CO/PES-Epoxi	71
Fig. 72: Curvas tensión-deformación CO/PES-BioEpoxi	72
Fig. 73: Curvas tensión-deformación CO/PES-Poliéster	72
Fig. 74: Curvas tensión-deformación HA-Epoxi	74
Fig. 75: Curvas tensión-deformación HA-BioEpoxi	74
Fig. 76: Curvas tensión-deformación HA-Poliéster	75
Fig. 77: Curvas tensión-deformación LI-Epoxi	76
Fig. 78: Curvas tensión-deformación LI-BioEpoxi	77
Fig. 79: Curvas tensión-deformación LI-Poliéster	77
Fig. 80: Curvas tensión-deformación SI-Epoxi	79
Fig. 81: Curvas tensión-deformación SI-BioEpoxi	79
Fig. 82: Curvas tensión-deformación SI-Poliéster	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diagrama de Gantt para la planificación del proyecto	16
Tabla 2: Propiedades mecánicas de diferentes tipos de fibras naturales potenciales para aplicar en compuestos [3].....	17
Tabla 3: Comparación entre fibras naturales y fibras de vidrio [5].....	18
Tabla 4: Propiedades de las fibras naturales en relación a las fibras de vidrio [5]	19
Tabla 5: Materiales usados en el proceso, sus riesgos y equipo de protección necesario	21
Tabla 6: Título del hilo de Algodón-Poliéster	23
Tabla 7: Porcentaje de cada materia en el hilo CO/PES.....	24
Tabla 8: Primer grupo de medidas tomadas del hilo CO/PES	25
Tabla 9: Segundo grupo de medidas tomadas del hilo CO/PES	26
Tabla 10: Título del hilo de cáñamo	28
Tabla 11: Primer grupo de medidas tomadas del hilo de cáñamo	28
Tabla 12: Segundo grupo de medidas tomadas del hilo de cáñamo	29
Tabla 13: Título del hilo de lino	29
Tabla 14: Primer grupo de medidas tomadas del hilo de lino	30
Tabla 15: Segundo grupo de medidas tomadas del hilo de lino	30
Tabla 16: Título del hilo de sisal	31
Tabla 17: Primer grupo de medidas tomadas de la fibra de sisal	32
Tabla 18: Segundo grupo de medidas tomadas de la fibra de sisal	32
Tabla 19: Tercer grupo de medidas tomadas de la fibra de sisal.....	33
Tabla 20: Cuarto grupo de medidas tomadas de la fibra de sisal	33
Tabla 21: Datos técnicos de resina epoxi MasterBrace P3500	35
Tabla 22: Datos técnicos de la resina BioEpoxi ONE Epoxy	36
Tabla 23: Datos técnicos de la resina de poliéster SILMAR SIL66BQ-249A.....	37
Tabla 24: Datos técnicos de la resina de poliéster CRONOLITA 3015 ACTIVADA	37
Tabla 25: Datos técnicos de la resina de poliéster resoltech 1200.....	38
Tabla 26: Proporciones en peso de resina/endurecedor o catalizador	43
Tabla 27: Resultados numéricos del ensayo a tracción Algodón/Poliéster	70
Tabla 28: Resultados numéricos del ensayo a tracción Cáñamo	73
Tabla 29: Resultados numéricos del ensayo a tracción Lino.....	75
Tabla 30: Resultados numéricos del ensayo a tracción Sisal	78
Tabla 31: Propiedades mecánicas mallas tratadas con Epoxi	80
Tabla 32: Propiedades mecánicas mallas tratadas con Bio-Epoxi.....	81
Tabla 33: Propiedades mecánicas mallas tratadas con resina de Poliéster.....	82

LISTA DE ABREVIACIONES

TRM	Mortero con refuerzo textil (Textile-Reinforced Mortar)
FRP	Polímero reforzado con fibras (Fiber-Reinforced Polymer)
NFRG	Lechada reforzada con fibra natural (Natural Fiber-Reinforced Grout)
NFRP	Polímero reforzado con fibras naturales (Natural Fiber-reinforced Polymer)
CO	Fibra de algodón
LI	Fibra de lino
HA	Fibra de cáñamo
SI	Fibra de sisal
PES	Fibra de poliéster
E	Módulo de elasticidad o módulo de Young
ϵ	Elongación
σ	Tensión
\bar{X}	Valor promedio
S	Desviación estándar o desviación típica
CV	Coefficiente de variación



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y DESARROLLO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se presentará el proyecto y se conocerá el propósito del estudio, la justificación para haber realizado el proyecto, los objetivos que se marcaron, su alcance, cómo se ha estructurado y también su planificación.

1.1.1. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo tiene el propósito de marcar una continuidad en los estudios sobre TRM que el departamento del Laboratorio por la Innovación Tecnológica de Estructuras i Materiales (LITEM) está llevando a cabo. Se han caracterizado en estudios anteriores los hilos recubiertos con resina utilizados para las mallas, se conocen su comportamiento mecánico, pero no se conoce como se comportan mecánicamente las mallas textiles recubiertas con resina.

También conocemos cómo se comportan viguetas con TRM a flexión cíclica. Por tanto, para dar una continuidad al estudio es necesario conocer las propiedades mecánicas de los textiles recubiertos. Como afecta mecánicamente las diferentes resinas en un mismo sustrato y la comparación de un tipo de recubrimiento aplicado en diversos sustratos textiles.

1.1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es poder determinar características mecánicas a partir de un ensayo de tracción pura en probetas de mallas textiles de fibras vegetales de algodón, lino, cáñamo y sisal recubiertas con resinas epoxi, bio-epoxi y de poliéster. A partir de esto relacionaremos las propiedades mecánicas entre los diferentes materiales compuestos creados. Siendo este el principal objetivo del trabajo, se especifican objetivos menores que se alcanzaran para poder desarrollar el proyecto. Para completar el proyecto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar geométricamente los hilos de fibras vegetales propuestos en el proyecto.
- Diseñar un proceso experimental para la fabricación de las probetas de mallas textiles con recubrimiento de resina.
- Ensayar a tracción las probetas fabricadas.

- Procesar los datos obtenidos en el ensayo de tracción.
- Analizar y extraer propiedades mecánicas de los datos del ensayo como el módulo de elasticidad, gráfico de tensión-deformación, carga máxima y máxima deformación.
- Comparar los resultados obtenidos entre los diferentes sustratos textiles y resinas
- Obtener resultados del estudio para valorar las opciones más adecuadas para el refuerzo de estructuras.

1.1.3. ALCANCE

El trabajo de final de grado tendrá el siguiente alcance:

- Caracterización de los hilos usados para la fabricación de las mallas textiles.
- Fabricación del telar donde se tejerán a mano los tejidos
- Planificación del proceso experimental, desde la fabricación de las muestras al ensayo de tracción pura.
- Análisis de los resultados obtenidos y su discusión.
- Medidas de seguridad y salud en el desarrollo experimental.

No se incluirán en el estudio los siguientes puntos:

- Hilatura de los hilos usados en el proyecto.
- Comportamiento de las probetas fabricadas con el mortero.
- Protocolo de tratamientos de residuos.

Como consideraciones especiales en el estudio se deberán tener en cuenta los siguientes puntos:

- Para la caracterización de los hilos y el cálculo de su área transversal consideramos el diámetro de los hilos circular.
- En el proyecto no planteamos el estudio mecánico de mallas textiles vegetales sin recubrir, consideramos que para la implementación de estas siempre estarán recubiertas para asegurar la durabilidad del material compuesto en la matriz de cemento y su adhesión.
- En el proceso de recubrimiento de la malla no controlamos el porcentaje de impregnación de esta.

1.1.4. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se dividió en varias fases, primeramente, se hizo un estudio sobre el estado del arte de la materia y la evolución de nuevas técnicas sobre TRM. En una segunda fase se organizó y

planificó el proceso experimental que se llevaría a cabo. La tercera fue la fase experimental, en ella se realizó la caracterización de los hilos, las mallas textiles recubiertas y se llevó a cabo el ensayo a tracción. La cuarta fase fue el análisis de datos y la extracción de resultados y conclusiones sobre los datos recopilados en el ensayo. A continuación, en la Tabla 1. se adjunta el diagrama del Gantt de este proyecto.

TABLA 1: DIAGRAMA DE GANTT PARA LA PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

Tareas	Inicio	Final	16/09/2019	22/09/2019	23/09/2019	24/09/2019	25/09/2019	26/09/2019	27/09/2019	29/09/2019	30/09/2019	01/10/2019	31/10/2019	04/11/2019	05/11/2019	10/11/2019	11/11/2019	15/11/2019	16/11/2019	22/11/2019	23/11/2019	24/11/2019	25/11/2019	28/11/2019	29/11/2019	06/01/2020	07/01/2020	15/01/2020	
Briefing de los tutores	16/09/2019	16/09/2019																											
Investigación y recopilación bibliográfica	16/09/2019	31/10/2019																											
Creación del índice del proyecto	23/09/2019	29/09/2019																											
Inventario del laboratorio	24/09/2019	25/09/2019																											
Listado de material requerido para el proyecto	25/09/2019	26/09/2019																											
Construcción del segundo telar	30/09/2019	01/10/2019																											
Fabricación de probetas	02/09/2019	04/11/2019																											
Ensayos a tracción	04/11/2019	22/11/2019																											
Recopilación de datos experimentales	25/11/2019	28/11/2019																											
Redacción del proyecto	30/09/2019	06/01/2020																											
Entrega del proyecto	15/01/2020	15/01/2020																											

1.1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Este proyecto se estructurará en tres documentos, un primer documento que será esta memoria. Donde se especifican los conocimientos teóricos aplicados al estudio, los requerimientos de este estudio, el desarrollo del proyecto tanto teórico como experimental. La recolección de los datos experimentales y su tratamiento y análisis, y seguidamente las conclusiones del estudio.

En un segundo documento se encuentra el presupuesto del proyecto, se detallan los costes de los materiales utilizados, recursos humanos y los costes de la instrumentación y equipamiento utilizados, calculando así el coste total del proyecto.

En el anexo se incluyen gráficos, tablas y fichas técnicas que se referencian en la memoria y ayuda a la comprensión total del estudio.

1.2. ESTADO DEL ARTE

Cada vez más crece la preocupación por el recurrente uso de materiales inorgánicos y derivados de fuentes no renovables en la construcción y su impacto medioambiental. Además de la preocupación ambiental se une el factor económico, el precio de los materiales procedentes de fuentes no renovables como el petróleo está estrechamente ligado con la fluctuación de este. Por tanto, cada vez más se tiende a investigar y desarrollar alternativas para el uso de nuevos

materiales o materiales ya existentes procedentes de recursos renovables o bien el uso de materiales reciclados. En las obras civiles se empiezan a hacer intentos para reemplazar materiales frecuentemente usados como el carbono o las fibras de vidrio por fibras naturales[1].

Los compuestos con fibras naturales van ganando interés como material alternativo en aplicaciones estructurales. Los compuestos con fibras naturales ofrecen una mejor degradación y reciclabilidad que compuestos inorgánicos. Estos compuestos presentan propiedades mecánicas de altos interés como baja densidad, peso moderado, relación resistencia/rigidez y alta resistencia al impacto[2]. En la Tabla 1 podemos comparar tres propiedades mecánicas la tensión de rotura, el alargamiento a la rotura y el módulo elástico de una gran variedad de fibras naturales la mayoría vegetales y dos fibras de origen animal, lana y seda.

TABLA 2: PROPIEDADES MECÁNICAS DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS NATURALES POTENCIALES PARA APLICAR EN COMPUESTOS [3]

	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young modulus (GPa)
<i>Natural fibres</i>			
Flax	300–1500	1.3–10	24–80
Jute	200–800	1.16–8	10–55
Sisal	80–840	2–25	9–38
Kenaf	295–1191	3.5	2.86
Pineapple	170–1627	2.4	60–82
Banana	529–914	3	27–32
Coir	106–175	14.21–49	4–6
Oil palm (empty fruit)	130–248	9.7–14	3.58
Oil palm (fruit)	80	17	
Ramie	348–938	1.2–8	44–128
Hemp	310–900	1.6–6	30–70
Wool	120–174	25–35	2.3–3.4
Spider silk	875–972	17–18	11–13
Cotton	264–800	3–8	5–12.6

En la clasificación de fibras naturales encontramos tres tipologías distintas, fibras de origen vegetal, fibras de origen animal y fibras de origen mineral. Cada categoría engloba diferentes fibras según su procedencia y características. Las fibras se caracterizan por diferentes propiedades debido a la falta de uniformidad en su estructura. Sus propiedades mecánicas, físicas y geométricas están caracterizadas por diversos factores como su naturaleza hidrofílica, el contenido de humedad, dimensiones celulares y morfología de la planta [1].

Uno de los principales inconvenientes de las fibras vegetales es la irregularidad en su proceso y en su hilado. Por ese motivo, no es difícil encontrar un gran rango de valores en sus propiedades mecánicas. Pongamos por ejemplo los hilos de fibras vegetales procedentes del algodón, debido a la gran variedad de razas de plantas de algodón. Cada raza produce fibras de diferentes longitudes y propiedades mecánicas, y aunque seamos capaces de englobar todas las variedades según sus características estas están también a la merced de las condiciones climatológicas y el postproceso de cada cosecha. A diferencia de las fibras sintéticas donde los procesos de

extrusión y estiraje son mucho más regulares y permiten obtener una mayor uniformidad en sus características mecánicas y físicas.

Pese a esta reflexión encontramos estudios dónde los valores de las propiedades mecánicas y su comportamiento para el refuerzo de estructuras hacen de las fibras vegetales una alternativa apta para su uso en construcción [1].

Las plantas que producen fibras vegetales son clasificables por su origen anatómico por primarias y secundarias en función de su utilización para extraer las fibras vegetales. Las plantas primarias se cultivan por su contenido en fibras como por ejemplo la planta de algodón, yute y cáñamo. Las plantas secundarias son las que producen fibras vegetales como subproducto de ellas mismas como la piña, la palma y el coco [4].

Otra clasificación de fibras vegetales que podemos encontrar es según la parte de la planta de donde proceden. Siendo esta clasificación de tres tipos:

- Fibras procedentes de la hoja de la planta: sisal, piña, esparto, miraguano, entre otras.
- Fibras procedentes del tallo: lino, cáñamo, ramio, yute, bambú, entre otras.
- Fibras procedentes del fruto y las semillas: algodón, coco y kapok entre otras.

En la Tabla 3 podemos ver una comparativa de propiedades y especificaciones entre las fibras naturales y la fibra de vidrio. Así como en la Tabla 4 también se comparan propiedades mecánicas y físicas entre las fibras vegetales de cáñamo, yute, lino y sisal con las propiedades de la fibra de vidrio.

TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE FIBRAS NATURALES Y FIBRAS DE VIDRIO [5]

	Fibras naturales	Fibra de Vidrio
Densidad	Baja	El doble que las fibras naturales
Coste	Bajo	Bajo pero mayor al de las fibras naturales
Renovabilidad	Sí	No
Reciclables	Sí	No
Consumo energético	Bajo	Alto
Distribución	Sí	Sí
Emisiones de CO₂	Neutral	No neutral
Abrasión de maquinaria	No	Sí
Peligro para la salud en su inhalación	No	Sí
Residuo	Biodegradable	No biodegradable

TABLA 4: PROPIEDADES DE LAS FIBRAS NATURALES EN RELACIÓN A LAS FIBRAS DE VIDRIO [5]

Propiedades	Fibra de Vidrio	Cáñamo	Yute	Sisal	Lino	Algodón
Densidad (g/cm ³)	2,55	1,48	1,46	1,33	1,4	1,51
Tensión de rotura (MPa)	2400	550-900	400-800	600-700	800-1500	400
Módulo elástico (GPa)	73	70	10-30	38	60-80	12
Alargamiento a la rotura (%)	3	1,6	1,8	2-3	1,2-1,6	3-10
Higroscopicidad (%)	-	8	12	11	7	8-25

En el estado del arte de las fibras naturales publicado por Shireesha et al. [2], publicaron un gráfico donde aparece el porcentaje de aplicación de fibras naturales por el sector de la construcción.

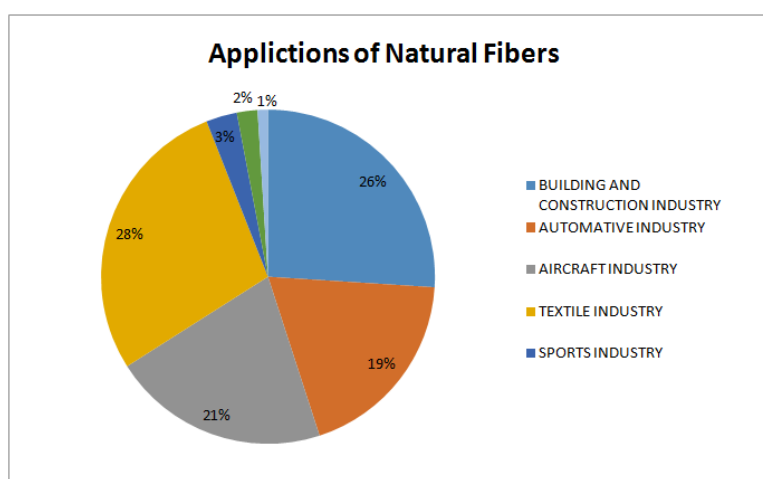


FIG. 1: APLICACIONES DE LAS FIBRAS NATURALES [2]

En el estudio experimental para conocer el comportamiento de los compuestos de fibras vegetales para el refuerzo de estructuras de mampostería realizado por Codisporti et al. [1] se realizó una caracterización mecánica de tejidos de fibras vegetales y se estudió la adherencia entre los materiales compuestos y la mampostería. Se utilizaron tejidos de lino, cáñamo, sisal y yute. Se realizaron ensayos a tracción de tejidos impregnados y no impregnado con dos matrices diferentes, una matriz polimérica epoxi y una matriz de resina de poliéster para producir NFRP y una matriz a base de mortero para producir NFRG. En una segunda parte del estudio se realizaron pruebas de flexión y extracción para estudiar el comportamiento del NFRP.

Se comprobó que el lino fue el material con mayores propiedades mecánicas, seguido del yute y sisal. También los tejidos impregnados con la resina epoxi NFRP presentaron una mayor

resistencia a tracción que los recubiertos con resina de poliéster, para los tejidos con matriz de mortero comprobaron que eran necesarios más estudios, con respecto al grosor del mortero y la relación entre agua y las fibras.

Otros estudios han investigado las propiedades mecánicas de materiales compuestos a partir de la hibridación de fibras sintéticas con fibras naturales, se ha demostrado que puede ser un método eficaz para la mejora de las propiedades mecánicas [6]. La investigación se desarrolló usando un material compuesto a partir de un tejido de lino y carbono logrando una buena flexibilidad y resistencia. Otro estudio utilizando la hibridación de fibras de origen vegetal con fibras sintéticas obtuvo resultados satisfactorios combinando fibras de lino, cáñamo y agave con fibras de vidrio en un compuesto híbrido de poliuretano [7].

A pesar de todas las ventajas mencionadas, la utilización y la producción de compuestos de matriz cementítica reforzados con fibras vegetales TRM está limitada por la durabilidad a largo plazo de estos materiales [8]. El problema de la durabilidad se asocia con el aumento de fracturas en las fibras debido al debilitamiento de las fibras por el ataque alcalino de la matriz y la mineralización de la fibra por la sobre hidratación del lumen de esta, también debido a la variación del espacio y de volumen por la absorción de agua.

La alcalinidad y la presencia de agua en el medio junto con el paso del tiempo hace que el material tenga una reducción en la resistencia y una reducción de la tenacidad después del agrietamiento. El papel de las fibras vegetales como refuerzo radica en combinar el enlace interfacial adecuado entre la fibra y la matriz como garantizar su durabilidad. En el estudio realizado por Ardanuy et al. [8] revisa métodos para paliar o reducir la problemática mencionada:

- Adiciones puzolánicas: introducidos en la conformación del mortero o en las fibras en una atmósfera de CO₂. [9]
- Refinado de la fibra con tratamientos químicos que atacan la superficie de la fibra o tratamientos de cornificación. [9]

El estudio desarrollado por Ahmad et al. [10] afirma que el recubrimiento de fibras naturales con resina mejora las propiedades interfaciales y el rendimiento estructural de los compuestos de fibras naturales con matriz de cemento. Encontró que al recubrir las fibras vegetales con ciertas resinas como la resina de poliuretano el material compuesto podía llegar a alcanzar una resistencia mecánica a flexión que rivaliza con la de compuestos convencionales reforzados con acero.

1.3. SEGURIDAD Y RIESGOS DEL LABORATORIO

Para inicial el proceso experimental, se deben tener en cuenta los riesgos y peligros del entorno de trabajo. Por ese motivo al inicio del proceso experimental se estudiaron los documentos de seguridad y salud adjuntos en el Anexo:

- Identificación de riesgos y medidas preventivas del departamento de resistencia de materiales y estructuras en la ingeniería para el laboratorio de innovación tecnológica para estructuras y materiales (LITEM).
- Manual de salud y seguridad para estudiantes del servicio de prevención de riesgos laborales de la Universidad Politécnica de Cataluña.

En la siguiente tabla se describen los materiales utilizados en el proceso experimental, los riesgos que conllevan y la indumentaria de seguridad que requieren:

TABLA 5: MATERIALES USADOS EN EL PROCESO, SUS RIESGOS Y EQUIPO DE PROTECCIÓN NECESARIO

Productos y materiales	Riesgos	EPIs
Productos químicos para la marcha analítica: <ul style="list-style-type: none"> • Ácido fórmico • Nitrobenceno 	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación y enrojecimiento • Dolor ocular y visión borrosa • Quemaduras y graves lesiones cutáneas • Irritación en las vías respiratorias y sistema digestivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Bata de laboratorio • Gafas de seguridad • Guantes de látex • Mascarilla • Pantalón largo • Zapato cerrado
Operaciones de taladrado en madera, uso de matillo y clavos	<ul style="list-style-type: none"> • Cortes • Evitar las astillas que saltan de la madera durante el corte • Golpes en los dedos 	<ul style="list-style-type: none"> • Guantes mecánicos • Gafas de seguridad • Bata de laboratorio • Mascarilla
Manipulación de resinas	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación cutánea y ocular • Mareo e irritación en su inhalación 	<ul style="list-style-type: none"> • Bata de laboratorio • Gafas de seguridad • Guantes de látex • Mascarilla • Pantalón largo • Zapato cerrado • Pelo largo recogido
Manipulación de disolvente para la limpieza de materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Vértigo, somnolencia y daños en el sistema nervioso en largas exposiciones • Irritación de vías respiratorias 	<ul style="list-style-type: none"> • Bata de laboratorio • Gafas de seguridad • Guantes de PVC • Mascarilla • Pantalón largo • Zapato cerrado

Corte de fibra de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación cutánea y ocular • Alta inflamabilidad 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación cutánea 	<ul style="list-style-type: none"> • Guantes mecánicos • Bata de laboratorio • Gafas de seguridad

1.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS HILOS

Para un correcto estudio y un posterior análisis de datos es imprescindible hacer una correcta caracterización de los hilos en estudio. Todos los hilos estudiados son de origen vegetal, formados la mayor parte por una estructura celulósica. En el estudio constan cuatro hilos diferentes: algodón/poliéster, cáñamo, lino y sisal ver Fig. 2.



FIG. 2: HILOS DE ALGODÓN, CÁÑAMO, LINO Y SISAL USADOS EN EL PROYECTO

El único hilo que se incluye en el estudio que consta de cabos de diferente tipología, son los hilos de algodón/poliéster. En estos hilos encontramos unos cabos de algodón y otros cabos de poliéster, en el apartado 1.3.1. Algodón/Poliéster se describirá en detalle su naturaleza.

1.4.1. ALGODÓN/POLIÉSTER

Se realizó un primer estudio visual del hilo proporcionado por el departamento del LITEM y se comprobó que el hilo trenzado consta de ocho cabos de algodón 100% hilados por un proceso de hilatura Open-end y veinticuatro cabos formados por fibras sintéticas. El hilo de algodón es del fabricante de cuerdas y cordeles Rombull Ronets y para asegurarse de la distinta naturaleza de los cabos, con un mechero se quemó los cabos de algodón. Estos al quemar desprendían humo blanco con olor a papel quemado característico de las fibras celulósicas y su ceniza era parecida a la del papel quemado. Sin embargo, cuando quemamos los cabos que parecían

procedentes de fibras sintéticas, estos se fundían sin hacer ceniza. Al fundir formaban una bola característica de los materiales plásticos y el humo que desprendían tenía un olor picante.

En el etiquetado del hilo, no se especificaba que hubiera fibras sintéticas. Por esa razón fue necesaria la realización de una marcha analítica en el laboratorio para averiguar de qué fibra sintética se trataba.

El título del hilo es un parámetro importante para su caracterización así determinamos la masa lineal de un hilo, en los sistemas directos se sabe que el parámetro Tex determina la masa en gramos que encontramos en 1000m de hilo. Por este motivo en el laboratorio se pesó 100cm de hilo CO/PES en una balanza de precisión de $\pm 0,0001g$.

TABLA 6: TÍTULO DEL HILO DE ALGODÓN-POLIÉSTER

Longitud (cm)	Peso (g)	Tex
100 $\pm 0,1$	1,0576 $\pm 0,0001$	1057,6 $\pm 0,1$

Como en hilo de algodón encontramos dos materias diferentes, algodón y poliéster, sacamos el porcentaje de algodón y de poliéster que encontramos en el hilo.

En un trozo de hilo que pesa 0,1104g separamos los cabos de algodón y los pesamos 0,0823g y pesamos los cabos de poliéster 0,0281g.

Para calcular el porcentaje sabemos:

$$\%_{PES} = \frac{m_{PES}}{m_{TOTAL}} \cdot 100 = \frac{0,0281}{0,1104} \cdot 100 = 25,45\% \quad \text{Ec. 1}$$

$$\%_{Co} = \frac{m_{Co}}{m_{TOTAL}} \cdot 100 = \frac{0,0823}{0,1104} \cdot 100 = 74,54\% \quad \text{Ec. 2}$$

Sabemos las incertidumbres tanto de la balanza del laboratorio:

$$\Delta \%_{PES} = \left| \frac{\partial \%_{PES}}{\partial m_{PES}} \right| \cdot \Delta m_{PES} + \left| \frac{\partial \%_{PES}}{\partial m_{TOTAL}} \right| \cdot \Delta m_{TOTAL} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\Delta \%_{Co} = \left| \frac{\partial \%_{Co}}{\partial m_{Co}} \right| \cdot \Delta m_{Co} + \left| \frac{\partial \%_{Co}}{\partial m_{TOTAL}} \right| \cdot \Delta m_{TOTAL} \quad \text{Ec. 4}$$

Calculamos la incertidumbre del porcentaje para el poliéster:

$$\begin{aligned}\Delta\%_{PES} &= \frac{1}{m_{TOTAL}} \cdot 100 \cdot 0,0001 + \left| -\frac{100 \cdot m_{PES}}{m_{TOTAL}^2} \right| \cdot 0,0001 \\ &= \frac{1}{0,1104} \cdot 100 \cdot 0,0001 + \left| -\frac{100 \cdot 0,0281}{0,1104^2} \right| \cdot 0,0001 \quad \text{Ec. 5} \\ &= 0,1136\end{aligned}$$

Calculamos la incertidumbre del porcentaje para el algodón:

$$\begin{aligned}\Delta\%_{Co} &= \frac{1}{m_{TOTAL}} \cdot 100 \cdot 0,0001 + \left| -\frac{100 \cdot m_{Co}}{m_{TOTAL}^2} \right| \cdot 0,0001 \\ &= \frac{1}{0,1104} \cdot 100 \cdot 0,0001 + \left| -\frac{100 \cdot 0,0823}{0,1104^2} \right| \cdot 0,0001 \quad \text{Ec. 6} \\ &= 0,1581\end{aligned}$$

Expresamos los resultados con su incertidumbre, constando esta de una cifra significativa:

TABLA 7: PORCENTAJE DE CADA MATERIA EN EL HILO CO/PES

Materia:	Porcentaje de materia:
PES	(25,5±0,1) %
CO	(74,5±0,2) %

Para el ensayo a tracción pura a la que someteremos las muestras es imprescindible saber la sección transversal de los hilos. Para poder comparar los diferentes resultados de las diferentes muestras tendremos que saber la fuerza ejercida en el ensayo por unidad de área. Entonces en la caracterización de los hilos se incluye el cálculo del diámetro de los diferentes hilos considerados en el proyecto y su área transversal.

Para el cálculo de la sección transversal estimaremos que todas las secciones transversales de los hilos considerados son circulares.

A continuación, se detallará el procedimiento usado para el cálculo del diámetro de los hilos, en este apartado se hará referencia al hilo de algodón.

En el laboratorio cortamos dos trozos del hilo de algodón, cada trozo lo colocamos sobre un porta objetos y añadimos una gota de una solución de contraste a cada uno con cuentagotas. Cubrimos las muestras intentando que no haya ninguna burbuja con un cubreobjetos. Encendemos el microscopio electrónico y lo sincronizamos con el ordenador para poder tomar fotografías. Para tomar medidas en las fotografías realizadas nos aseguramos que las imágenes obtenidas del microscopio están bien calibradas.

De cada muestra preparada tomaremos 10 medidas de su longitud transversal, por tanto, obtendremos 10 diámetros de cada muestra. Con un total de 20 diámetros. En una tabla Excel calculamos el área de cada diámetro y calcularemos el área promedio de cada 10 medidas.

De cada 10 medidas obtendremos un promedio y entre estos dos promedios obtendremos el área final que usaremos para calcular la tensión a la que se someterán las mallas textiles. Se realizará el promedio de las dos áreas porque cada una han sido extraídas de distintos cortes del hilo.

En la Fig. 2 podemos ver una imagen de la primera muestra de hilo de algodón poliéster donde se tomaron el primer grupo de medidas. La Fig. 3 nos muestra otra imagen de la segunda muestra del hilo de algodón de donde se extrajeron el segundo grupo de medidas.

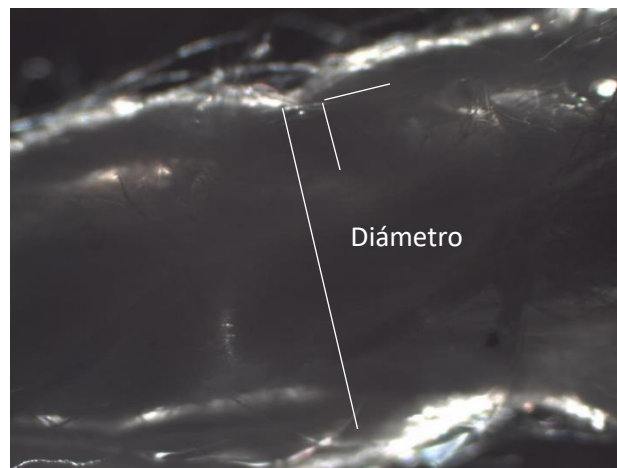


FIG. 3: IMAGEN REALIZADA POR EL MICROSCOPIO DEL HILO DE ALGODÓN/POLIÉSTER

TABLA 8: PRIMER GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO CO/PES

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,8306	0,5418
2	0,7380	0,4278
3	0,7687	0,4641
4	0,7438	0,4345
5	0,6975	0,3821
6	0,7172	0,4040
7	0,6274	0,3092
8	0,5856	0,2693
9	0,6255	0,3073
10	0,6375	0,3192
	\bar{x} :	0,3859
	S:	0,0850
	CV (/):	0,2202

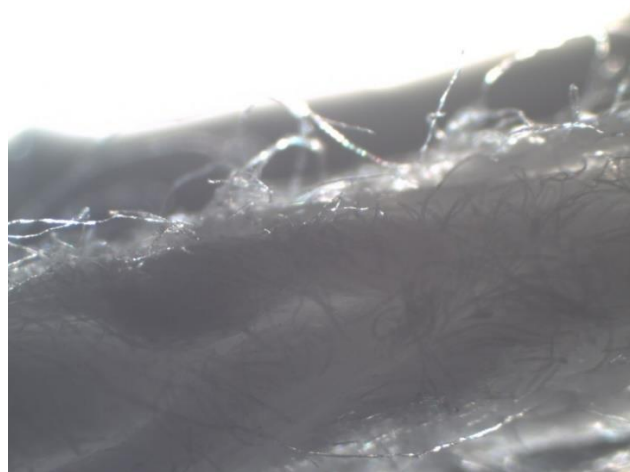


FIG. 4: IMAGEN REALIZADA POR EL MICROSCOPIO DEL HILO DE ALGODÓN/POLIÉSTER

TABLA 9: SEGUNDO GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO CO/PES

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,5217	0,2138
2	0,5685	0,2538
3	0,5069	0,2018
4	0,5373	0,2267
5	0,5482	0,2360
6	0,4372	0,1501
7	0,4530	0,1612
8	0,4382	0,1508
9	0,4666	0,1710
10	0,4384	0,1509
	\bar{x} :	0,1916
	S:	0,0395
	CV (/):	0,2063

Cada probeta ensayada de hilo Co/PES cuenta con 16 hilos de urdimbre por tanto el área efectiva será de:

$$A_1=0,3859\text{mm}^2$$

$$A_2=0,1916\text{mm}^2$$

Se puede apreciar que las áreas obtenidas son bastante diferentes, debido a que en el proyecto usamos hilos bastos de fibras vegetales. Estos presentan una gran irregularidad en el hilado, los hilos tratados no tienen un proceso de hilatura tan extenso como los hilos que podríamos utilizar en los textiles para indumentaria o aplicaciones técnicas con altos requerimientos.

El área promedio es de $A_{Co/PES} = 0,2888\text{mm}^2$ y un área de estiraje efectiva por probeta de $A_{efectiva\ Co/PES} = 0,2888\text{mm}^2 \cdot 16\text{ hilos} = 4,6208\text{mm}^2$

1.4.1.1. PROCEDIMIENTO ANÁLISIS QUÍMICO

La marcha analítica realizada contó con los siguientes materiales de laboratorio:

- Mechero Bunsen
- 2 vasos de precipitados
- Pinza de madera
- 2 tubos de ensayo
- Gradilla
- Solución de ácido fórmico H-COOH
- Solución de nitrobenzeno $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$
- Muestras de los cabos sintéticos a analizar

Con la indumentaria de laboratorio adecuada, calzado tapado, pantalones largos, bata de laboratorio y gafas de seguridad procedemos a meter una cantidad adecuada para el análisis de las muestras de fibras sintéticas en un tubo de ensayo con ayuda de una varilla, reservamos en la gradilla el tubo de ensayo con la muestra. Abrimos la solución de ácido fórmico y vertemos una cantidad suficiente para la posible disolución de la fibra en el disolvente en un vaso de precipitados, pipeteamos de este con una pipeta Pasteur y la introducimos en el tubo de ensayo. Abrimos la llave del gas y encendemos el mechero bunsen, con la pinza de madera cogemos el tubo de ensayo y lo calentamos con la llama del mechero Bunsen, hacemos movimientos de vaivén para evitar la ebullición de la solución.

Pasados unos minutos, comprobamos que la muestra no se ha disuelto. Este hecho nos verifica que no se trata de poliamida y seguiremos con la marcha analítica para verificar que sea poliéster.

Para determinar si se trata de poliéster realizaremos la marcha analítica con nitrobenzeno. Introducimos nuevamente cabos con la fibra sintética del hilo de algodón en un tubo de precipitados con la ayuda de una varilla, reservamos en la gradilla. Cogemos la solución de nitrobenzeno y vertimos una cantidad suficiente de nitrobenzeno para la disolución de la fibra en un vaso de precipitados, con la pipeta Pasteur añadimos una cantidad suficiente del vaso de precipitados al tubo de ensayo con la muestra. Con la pinza de madera cogemos el tubo de ensayo y con un movimiento de vaivén para evitar la ebullición calentamos la solución de nitrobenzeno con la muestra.

La muestra de las fibras sintéticas se disolvió en nitrobenzeno, comprobando así que la segunda materia aparte de algodón encontrada en el hilo es poliéster.

1.4.2. CÁÑAMO

El hilo de cáñamo usado en el proyecto, es de cáñamo 100% de dos cabos de doble torsión. A continuación, calcularemos el título del hilo de cáñamo:

TABLA 10: TÍTULO DEL HILO DE CÁÑAMO

Longitud (cm)	Peso (g)	Tex
100±0,1	0,4206±0,0001	420,60±0,04

Para el cálculo del diámetro del hilo del cáñamo se usó el mismo procedimiento que en el caso del hilo del algodón. Mediante la toma de imágenes calibradas por el microscopio, el programa informático del ordenador sincronizado con el microscopio nos permite medir con una precisión de 0,0001mm el diámetro de la fibra:

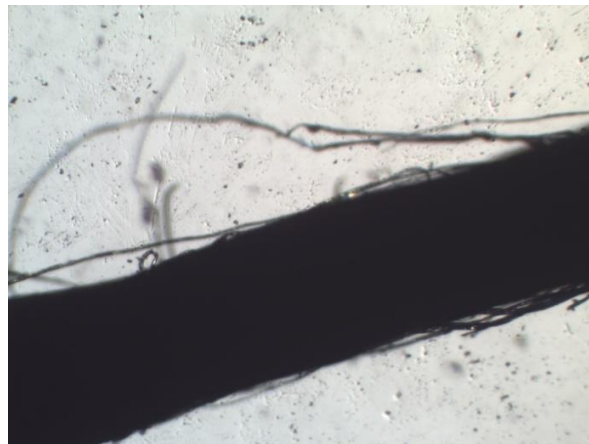


FIG. 5: IMAGEN REALIZADA POR EL MICROSCOPIO DEL HILO DE CÁÑAMO

TABLA 11: PRIMER GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO DE CÁÑAMO

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1	0,4034	0,1278
2	0,5467	0,2347
3	0,3995	0,1253
4	0,3718	0,1086
5	0,3945	0,1222
6	0,3288	0,0849
7	0,3301	0,0856
8	0,3189	0,0799
9	0,3084	0,0747
10	0,3239	0,0824
	\bar{x} :	0,1126
	S:	0,0475
	CV (/):	0,4221

TABLA 12: SEGUNDO GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO DE CÁÑAMO

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,3803	0,1136
2	0,3866	0,1174
3	0,3566	0,0999
4	0,4021	0,1270
5	0,4089	0,1313
6	0,4125	0,1336
7	0,4309	0,1458
8	0,4705	0,1739
9	0,5264	0,2176
10	0,4552	0,1627
	\bar{x} :	0,1423
	S:	0,0346
	CV (/):	0,2432

Cada probeta ensayada de hilo de cáñamo cuenta con 32 hilos de urdimbre por tanto el área efectiva será de:

$$A_1 = 0,1126 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 0,1423 \text{ mm}^2$$

El área promedio es de $A_{\text{cáñamo}} = 0,1275 \text{ mm}^2$ y un área de estiraje efectiva por probeta de $A_{\text{efectiva cáñamo}} = 0,1275 \text{ mm}^2 \cdot 32 \text{ hilos} = 4,0800 \text{ mm}^2$

1.4.3. LINO

El hilo de lino usado en el proyecto, es de lino 100% de dos cabos de doble torsión. A continuación, calcularemos el título del hilo de lino:

TABLA 13: TÍTULO DEL HILO DE LINO

Longitud (cm)	Peso (g)	Tex
100±0,1	0,4754±0,0001	475,40±0,05

Para el cálculo del diámetro del hilo del lino se usó el mismo procedimiento que en el caso del hilo del algodón y de cáñamo:

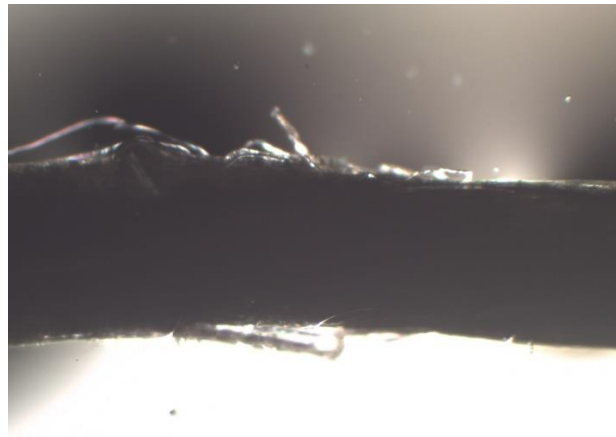


FIG. 6: IMAGEN REALIZADA POR EL MICROSCOPIO DEL HILO DE LINO

TABLA 14: PRIMER GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO DE LINO

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,282	0,0625
2	0,2991	0,0703
3	0,3253	0,0831
4	0,2843	0,0635
5	0,3447	0,0933
6	0,3237	0,0823
7	0,3391	0,0903
8	0,3393	0,0904
9	0,3501	0,0963
10	0,3698	0,1074
	\bar{X} :	0,0839
	S:	0,0147
	CV (/):	0,1751

TABLA 15: SEGUNDO GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DEL HILO DE LINO

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,3668	0,1057
2	0,3865	0,1173
3	0,3481	0,0952
4	0,3365	0,0889
5	0,3536	0,0982
6	0,3503	0,0964
7	0,3594	0,1014
8	0,3184	0,0796
9	0,3518	0,0972
10	0,3138	0,0773
	\bar{X} :	0,0957
	S:	0,0118
	CV (/):	0,1231

Cada probeta ensayada de hilo de cáñamo cuenta con 32 hilos de urdimbre por tanto el área efectiva será de:

$$A_1=0,0839\text{mm}^2$$

$$A_2=0,0957\text{mm}^2$$

El área promedio es de $A_{Lino} = 0,0898\text{mm}^2$ y un área de estiraje efectiva por probeta de $A_{efectiva\ Lino} = 0,0898\text{mm}^2 \cdot 32\ hilos = 2,8736\text{mm}^2$

1.4.4. SISAL

El hilo de sisal usado en el proyecto, es de sisal 100% de dos cabos de doble torsión. A continuación, calcularemos el título del hilo de sisal:

TABLA 16: TÍTULO DEL HILO DE SISAL

Longitud (cm)	Peso (g)	Tex
100±0,1	3,4511±0,0001	3451,1±0,3

Para el cálculo del diámetro del hilo del lino se usó el mismo procedimiento similar que en el caso del hilo del algodón, cáñamo y lino. Como tanto el hilo como los cabos de sisal eran muy gruesos y voluminosos para obtener las medidas en el microscopio se optó por medir 4 fibras diferentes del hilo del sisal y hacer diez medidas de cada una de ellas, y contar el número de fibras totales en el hilo de sisal y multiplicar el área resultante de la fibra por el número total de fibras encontradas en el hilo.

En este caso realizamos 10 medidas de 4 fibras diferentes por ser una fibra más basta que las demás y obtener un resultado más aproximado.

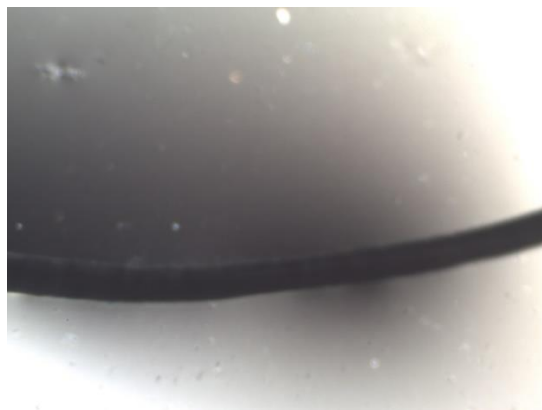


FIG. 7: IMAGEN REALIZADA POR EL MICROSCOPIO DE UNA FIBRA DE SISAL

TABLA 17: PRIMER GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DE LA FIBRA DE SISAL

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,0842	0,0056
2	0,0827	0,0054
3	0,0724	0,0041
4	0,0701	0,0039
5	0,0789	0,0049
6	0,0906	0,0064
7	0,0737	0,0043
8	0,0755	0,0045
9	0,0887	0,0062
10	0,0714	0,0040
	\bar{x} :	0,0049
	S:	0,0009
	CV (/):	0,1890

TABLA 18: SEGUNDO GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DE LA FIBRA DE SISAL

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,0572	0,0026
2	0,0611	0,0029
3	0,0461	0,0017
4	0,0382	0,0011
5	0,0545	0,0023
6	0,0573	0,0026
7	0,0311	0,0008
8	0,0511	0,0021
9	0,0505	0,0020
10	0,0407	0,0013
	\bar{x} :	0,0019
	S:	0,0007
	CV (/):	0,3641

TABLA 19: TERCER GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DE LA FIBRA DE SISAL

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,0570	0,0026
2	0,0378	0,0011
3	0,0479	0,0018
4	0,0488	0,0019
5	0,0585	0,0027
6	0,0787	0,0049
7	0,0640	0,0032
8	0,0602	0,0028
9	0,0652	0,0033
10	0,0634	0,0032
\bar{x} :		0,0027
S:		0,0010
CV (/):		0,3757

TABLA 20: CUARTO GRUPO DE MEDIDAS TOMADAS DE LA FIBRA DE SISAL

Muestra:	Diámetro (mm)	Área (mm ²)
1	0,1621	0,0206
2	0,1736	0,0237
3	0,1544	0,0187
4	0,1594	0,0200
5	0,1524	0,0182
6	0,1262	0,0125
7	0,1557	0,0190
8	0,1658	0,0216
9	0,1567	0,0193
10	0,1327	0,0138
\bar{x} :		0,0187
S:		0,0034
CV (/):		0,1787

Cada probeta ensayada de hilo de sisal cuenta con 8 hilos de urdimbre por tanto el área efectiva será de:

$$A_1=0,0049\text{mm}^2$$

$$A_2=0,0019\text{mm}^2$$

$$A_3=0,0027\text{mm}^2$$

$$A_4=0,0187\text{mm}^2$$

Al igual que en el caso del algodón, las fibras de sisal son a simple vista muy irregulares y bastas, por este motivo las cuatro áreas de los promedios de cada fibra medida tienen esta gran variación.

El área promedio es de $A_{sisal} = 0,0071\text{mm}^2$ y un área de estiraje efectiva por probeta de $A_{efectiva\ sisal} = 0,0071\text{mm}^2 \cdot 120\text{ fibras} \cdot 8\text{hilos} = 6,8160\text{mm}^2$

1.5. RESINAS DE RECUBRIMIENTO

En este apartado se dará una breve explicación de las resinas usadas en el proyecto. Esta explicación estará acompañada de una tabla de propiedades, para una información más detallada de cada resina se adjunta su la ficha técnica en el Anexo de este proyecto.

1.5.1. EPOXI

Como resina Epoxi se ha utilizado la resina MasterBrace P 3500, se trata de un sistema epóxico de dos componentes sin disolvente. El componente MasterBrace P 3500 Part A es la resina y el segundo componente MasterBrace SAT 4500 Part B es el endurecedor. La relación de mezcla en peso es de 100:50, siendo 100 de la parte A y 50 del endurecedor parte B.

Es adecuada para usarse sobre soportes de hormigón, acero y mampostería. Nos proporciona una laminación de baja viscosidad y alta adhesión. Para limpiar las herramientas utilizadas para la aplicación de la resina en el tejido es necesario limpiarlas con disolvente antes de su endurecimiento, en caso de que la resina epoxi ya esté endurecida solo se puede limpiar las herramientas mecánicamente.



FIG. 8: RESINA EPOXI MASTERBRACE P3500 Y ENDURECEDOR MASTERBRACE SAT 4500

TABLA 21: DATOS TÉCNICOS DE RESINA EPOXI MASTERBRACE P3500

Características	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Densidad (20º)	UNE-EN ISO 2811-1	g/cm ³	Aprox. 1,05
Temperatura de aplicación (soporte y material)	-	ºC	de +5 a +30
Ensayos a tracción:			
Rotura a tracción:	DIN 53504	N/mm ²	Aprox. 22,9±4
Deformación en rotura:		%	Aprox. 18,2±7
Ensayos a flexión:			
Rotura a flexión:	UNE-EN ISO 178:2003/ /A1:2005	MPa	No se rompe aprox. 233,1
Módulo a flexión:			
Ensayos a compresión:			
Rotura a compresión:	Pr EN 13412:2005	N/mm ²	No se rompe
Módulo a compresión:	ASTM D695		Aprox. 875±1
Adherencia:	UNE-EN ISO 4624:2003	N/mm ²	7±2 (rotura por hormigón)

1.5.2. BIO-EPOXI



FIG. 9: RESINA BIOEPOXI ONE EPOXY Y ENDURECEDOR
ONF HARDENER

Resina epoxi de alto contenido biológico, cuanta con 30% de contenido biológico. Es la alternativa más beneficiosa para el medio ambiente a las resinas epoxi tradicionales. Las resinas epoxi tradicionales provienen de fuentes no renovables, a diferencia de estas resinas bio-based que su contenido biológico proviene de productos derivados de vegetales.

Existen tres tipos de resina SuperSap con diferentes concentraciones de contenido biológico. Se eligió la resina SuperSap ONE ya que entre estas es la que presenta un mayor contenido biológico.

Como la anterior, es un sistema epoxico de dos componentes siendo la resina ONE Epoxy Part A y su endurecedor ONF Hardener Part B con un ratio de mezcla en peso de 100:43, siendo 100 de parte A y 43 de parte B.

La resina Bio-Epoxy Super Sap One ha sido mejorada para tener una menor viscosidad y una mayor velocidad de curación haciéndola ideal para destinarla en compuestos reforzados con fibras, laminados y recubrimientos.

TABLA 22: DATOS TÉCNICOS DE LA RESINA BIOEPOXI ONE EPOXY

Características y propiedades mecánicas	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Módulo de elasticidad:	ASTM D638	GPa	2,7
Fuerza de tensión:	ASTM D638	MPa	67,6
Elongación:	ASTM D638	%	6
Módulo de flexión:	ASTM D790	GPa	2,5
Módulo de rotura:	ASTM D790	MPa	82,1
Esfuerzo de compresión:	ASTM D695	MPa	77,9
Contenido en compuestos orgánicos volátiles:	ASTM D2369	g/l	21,0
Contenido de carbono de base biológica:	ASTM D6866	%	30

1.5.3. RESINA DE POLIÉSTER



Para el recubrimiento de resina de poliéster usamos un 50% en peso de la resina de poliéster SIL66BQ-249A de SILMAR con un 3% en peso de su catalizador BUTANOX M-50 y el 50% restante se añadirá de CRONOLITA 3015 ACTIVADA con un 3% en peso de su catalizador Mek Peroxide 0,1kg.

FIG. 10: RESINA DE POLIÉSTER SILMAR SIL66BQ-249A Y SU CATALIZADOR BUTANOX M-50

TABLA 23: DATOS TÉCNICOS DE LA RESINA DE POLIÉSTER SILMAR SIL66BQ-249A

Características y propiedades mecánicas	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Viscosidad a 25°C:	-	mPa·s	400-550
Resistencia a la flexión:	ASTM D-790	MPa	138,6
Módulo de flexión:	ASTM D-790	MPa	4095
Resistencia a tracción:	ASTM D-638	MPa	69,6
Módulo de elasticidad:	ASTM D-638	MPa	4206
Elongación a máxima resistencia:	ASTM D-638	%	1,9
Dureza:	ASTM D-2583	Barcol 934-1	42-44



La CRONOLITA 3015 ACTIVADA es una resina ortoftálica de poliéster no saturado que se utiliza comúnmente como un aditivo flexibilizante de resinas estándar. Es un material basado en el ácido ortoftálico que contiene entre un 35% y 45% de estireno.

FIG. 11: RESINA DE POLIÉSTER CRONOLITA 3015 ACTIVADA Y SU CATALIZADOR MEK PEROXIDE 0,1KG

TABLA 24: DATOS TÉCNICOS DE LA RESINA DE POLIÉSTER CRONOLITA 3015 ACTIVADA

Características y propiedades mecánicas	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Peso específico a 25°C:	-	g/cm ³	1,2
Viscosidad a 25°C:	-	mPa·s	350-550
Resistencia a tracción:	ISO 527	MPa	15
Elongación a la rotura:	ISO 527	%	50
Resistencia a la flexión:	ISO 178	MPa	10
Módulo de flexión:	ISO 178	MPa	220
Temperatura de deformación bajo carga:	ISO 75 ^a	°C	20

1.5.4. RESINA EPOXI PARA LA PREPARACIÓN DE LA SUJECIÓN DE LAS PROBETAS



La resina epoxi resoltech 1200 se usó para crear dos puntos de sujeción en las probetas textiles a fin de poder ensayarlas a tracción. El sistema epoxilico se compone por la resina epoxy resoltech 1200 y el endurecedor resoltetch 1204.

El ratio de mezcla en peso es 100:35, cada 100 partes de resina resoltech 1200 son necesarios 35 partes de endurecedor resoltech 1204.

FIG. 12: RESINA EPOXI RESOLTECH 1200 Y SU ENDURECEDOR RESOLTECH 1204

TABLA 25: DATOS TÉCNICOS DE LA RESINA DE POLIÉSTER RESOLTECH 1200

Características y propiedades mecánicas	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Densidad de la mezcla a 23°C:	ISO 1675	Kg/l	1,9
Viscosidad de la mezcla a 23°C:	ISO 12058	mPa·s	400
Módulo de elasticidad:	ISO 178	MPa	3450
Máxima resistencia:	ISO 178	MPa	110
Elongación a máxima resistencia:	ISO 178	%	3,7
Dureza:	ISO 868	Shore D	87
Absorción de agua:	ISO 62	%	0,22

CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL

Primeramente, se hizo una estimación del consumo total de hilo que se necesitaría, junto con la construcción de un telar, para poder agilizar el proceso de la creación de probetas. Como objetivo mínimo se tenían que recubrir las siguientes fibras: algodón, lino, cáñamo y sisal. Así como recubrirlas con resina Epoxi y resina de poliéster.

Se hizo una búsqueda de otras resinas o recubrimientos para ampliar y enriquecer el proyecto, se incorporó el uso de una resina BioEpoxi mencionada en el apartado 1.4.2. La incorporación de esta resina es interesante para comprobar si provee a las mallas textiles de propiedades mecánicas similares a la resina Epoxi sin contenido biológico.

2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

A continuación, se detallará el proceso experimental usado para la fabricación de las probetas las cuales se someterán a un ensayo de tracción pura.

2.1.1. FABRICACIÓN DEL TELAR

Para la fabricación del telar se tuvo en cuenta la geometría final deseada de la malla. Se diseñaron según la geometría comúnmente utilizada en otros estudios y comercialmente [11]. También en el laboratorio existía un telar ya hecho para anteriores trabajos finales de grado y tesis doctorales, por tanto, la geometría del telar y las probetas estaba determinada.

Se tuvo en cuenta que la curación de las resinas que aplicásemos en los tejidos se haría encima del telar por ese motivo se decidió fabricar un segundo telar para agilizar el proceso.

Los materiales utilizados en la fabricación del segundo telar fueron:

- Taladro
- 4 tornillos
- 2 listones de madera de 50cm de largo
- 2 listones de madera de 35cm de largo
- 38 clavos
- Escuadra de carpintero
- Lápiz

- Martillo
- Papel film
- Cinta adhesiva

El proceso de fabricación fue el siguiente, en la mesa de trabajo se unieron por los extremos con un tornillo y con la ayuda del taladro un listón de madera de 50cm de largo con otro de 35cm, para evitar que se moviesen de la mesa al hacer el taladro se sujetaron a la mesa de trabajo con dos sargentos. Repetimos este proceso con los dos listones restantes y luego unimos los cuatro con otros dos tornillos de manera que obtuvimos un marco de 35x50cm.

Seguidamente con la ayuda de un lápiz y una escuadra de carpintero marcamos 24 puntos a lo largo de los dos lados del marco que median 35cm con una separación de 12mm. Repetimos la misma operación siendo esta vez 14 marcas en cada lado de 50cm con una separación de 25mm.

Para evitar en un futuro que la resina se quedase pegada en la madera y pudiera con esto pegar también los hilos en la madera del telar, se recubrió el telar con papel film y ayuda de cinta adhesiva.

2.1.2. PREPARACIÓN DE LOS TEJIDOS

Se han fabricado un total de 24 tejidos, de estos 24 tejidos 6 de cada materia, algodón-poliéster, cáñamo, lino y sisal. De cada tejido se extrajeron 6 probetas. De los 6 tejidos de cada materia cada dos tejidos se trataron con cada resina epoxi, bio-epoxi y poliéster, resultando un total de 6+6 muestras para cada combinación de hilo/resina.

Cabe mencionar que la importancia del estudio recae en los hilos de urdimbre ya que serán los que soporten toda la carga ejercida sobre ellos y los hilos de trama se colocan primordialmente para la cohesión del tejido. Los calados que presentan los tejidos son bastante grandes para asegurar la adhesión del tejido en el mortero y para evitar deslizamientos. Los hilos de urdimbre se colocaron en mechones de cuatro, ocho, ocho y dos para el algodón, cáñamo, lino y sisal correspondientemente para asegurar los calados del tejido. El número de hilos que se pusieron en cada mechón vino establecido por la Tesis Doctoral de Luis Enrique Mercedes Cedeño [9] para dar continuidad al estudio. También se tiene en cuenta el área transversal efectiva resultante de las probetas de cada materia intentando que estas sean lo más iguales posibles.

El proceso de fabricación de los tejidos fue el siguiente, primeramente, se colocaron los hilos de urdimbre paralelamente enganchándolos en los clavos del telar. Una vez se colocaron los hilos de urdimbre los de trama se colocaron del mismo modo, pero intercalándolos con los mechones

de urdimbre (ver Fig. 12 y Fig. 13). Para una mejor visualización del ligado realizado ver los apartados siguientes.

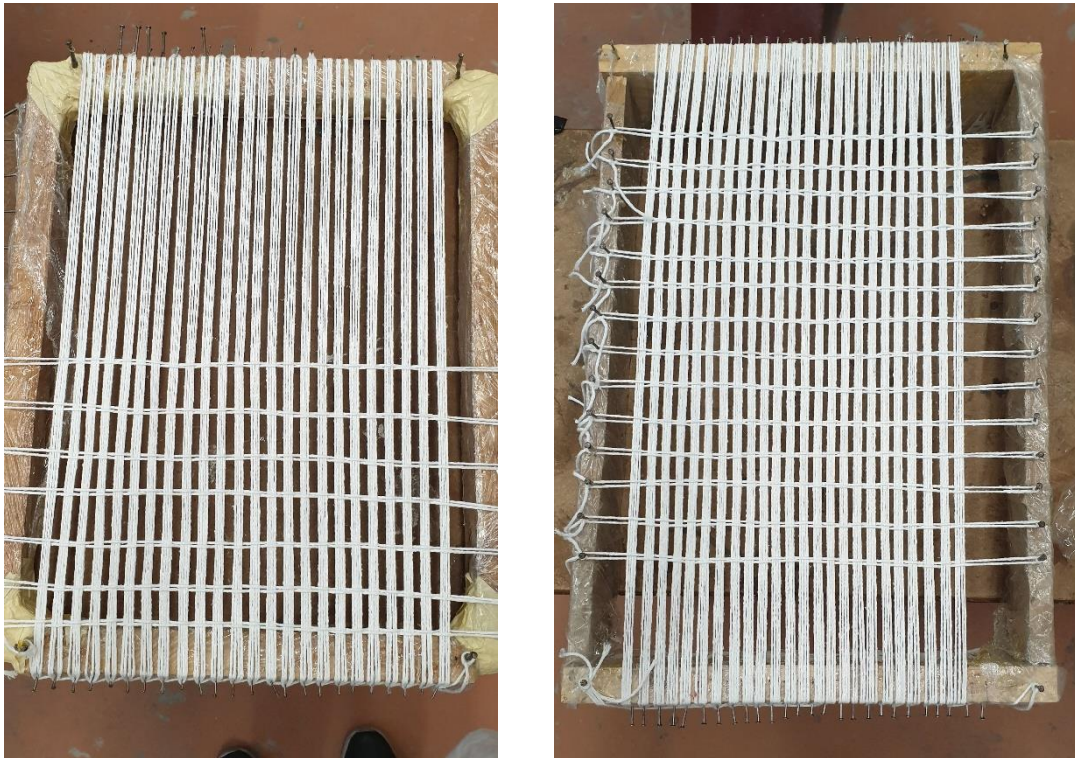


FIG. 13: PROCESO DE FABRICACIÓN DE MALLAS TEXTILES DE ALGODÓN



FIG. 14: INSERCIÓN DE HILOS DE TRAMA ENTRE LOS HILOS DE URDIMBRE

2.1.2.1. TEJIDO DE ALGODÓN/POLIÉSTER

Los tejidos de algodón poliéster tienen un total de 96 hilos de urdimbre y 28 hilos de trama, con la siguiente configuración:

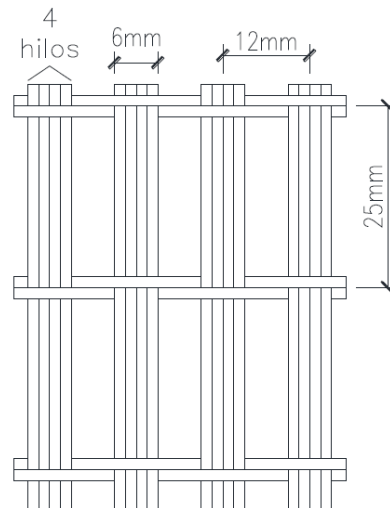


FIG. 15: CONFIGURACIÓN Y LIGADO DEL TEJIDO DE ALGODÓN-POLIÉSTER [9]

2.1.2.2. TEJIDOS DE CÁÑAMO Y LINO

Tanto los tejidos de cáñamo como los tejidos fabricados con lino presentan la misma configuración, un total de 192 hilos de urdimbre y 28 hilos de trama:

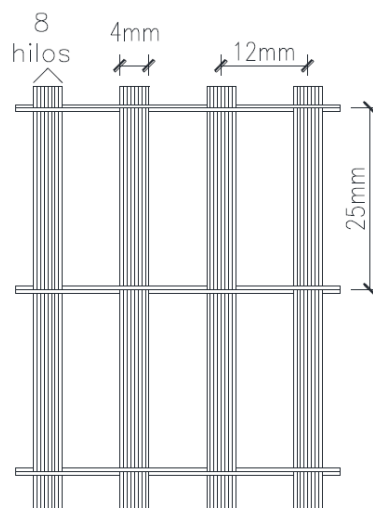


FIG. 16: CONFIGURACIÓN Y LIGADO DE LOS TEJIDOS DE CÁÑAMO Y LINO [9]

2.1.2.3. TEJIDO DE SISAL

Los tejidos de sisal presentan 48 hilos de urdimbre y 28 hilos de trama. Los hilos de trama en los tejidos de sisal son de cáñamo debido al grosor del hilo, si se hubieran puesto de sisal el tejido final presentaría un espesor muy elevado dificultando la adherencia al mortero. También

presentaría muchas irregulares debido a que el hilo de sisal presenta muchas irregularidades y está fabricado con fibras bastas.

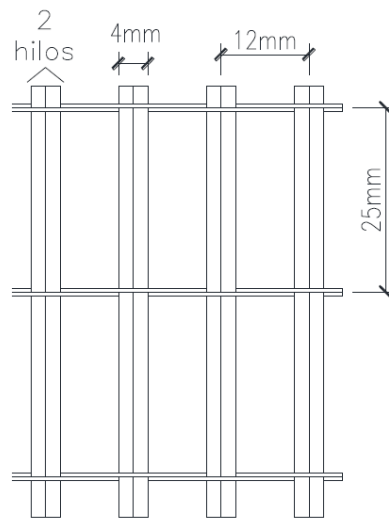


FIG. 17: CONFIGURACIÓN Y LIGADO DEL TEJIDO DE SISAL [9]

2.1.3. FASE DE RECUBRIMIENTO

Una vez teníamos el tejido en el telar, en lugar de sacarlo lo recubríamos en él ya que si no el tejido se desmontaría y recubrirlo en el telar asegura que los hilos de urdimbre mantengan su tensión.

El ratio de resina y endurecedor se especifica en la Tabla 26:

TABLA 26: PROPORCIONES EN PESO DE RESINA/ENDURECEDOR O CATALIZADOR

RATIO EN PESO		RESINA	ENDURECEDOR/CATALIZADOR
100:50		MasterBrace P 3500 Part A	MasterBrace SAT 4500 Part B
100:43		ONE Epoxy Part A	ONF Hardener Part B
50:50	100:3	SIL66BQ-249A	BUTANOX M-50
	100:3	CRONOLITA 3015 ACTIVADA	Mek peroxide 0,1kg

A continuación, se describen los materiales necesarios para la fase de recubrimiento:

- Papel de horno
- Balanza de laboratorio
- Vasos de plástico
- Varilla para remover
- Pinceles

El proceso de recubrimiento empezará por proteger las superficies de trabajo con papel de horno para prevenir cualquier derrame de resina. Para hacer la mezcla del recubrimiento vertemos en un vaso de plástico una cantidad adecuada de resina y en otro vaso vertemos el endurecedor. En la balanza de laboratorio taramos otro vaso y vamos vertiendo poco a poco la cantidad de resina que corresponda a la proporción que deseamos obtener. Una vez alcanzado el peso requerido taramos y vertemos la cantidad correspondiente de endurecedor.

Con una varilla mezclamos unos segundos hasta obtener una mezcla homogénea, con un pincel recubrimos tanto el derecho como el revés del tejido, así como se muestra en la Fig. 17.



FIG. 18: PROCESO DE RECUBRIMIENTO DEL TEJIDO CON RESINA

La cantidad de resina requerida por cada tejido es diferente ya que cada materia tiene una absorción diferente, durante el recubrimiento intentamos manualmente que la cobertura de resina fuera lo más uniforme y similar a todas las muestras.

2.1.4. PREPARACIÓN DE LA SUJECIÓN

A fin de que las mordazas en el ensayo de tracción tengan un buen agarre de las muestras y se pueda transmitir una correcta tensión por toda la malla se fabricaron una lámina en cada extremo de FRP de vidrio.

Los materiales usados para la fabricación del FRP de vidrio fueron:

- Tiras de no tejido de fibra de vidrio de 4cm de ancho por 150cm de largo.

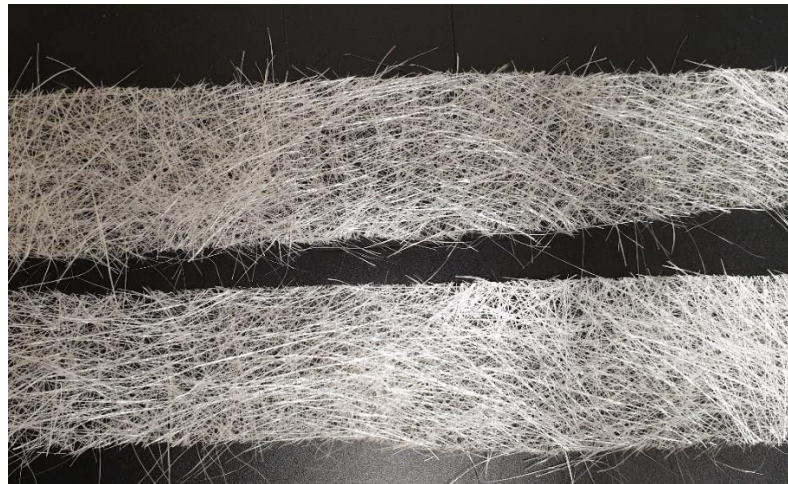


FIG. 19: TIRAS DE NO TEJIDO DE FIBRA DE VIDRIO

- Resina epoxi resoltech 1200 y endurecedor resoltech 1204 con un ratio de 100:35 en peso.
- Pinceles
- Varillas para remover
- Vasos de plástico
- Balanza de laboratorio
- Papel de cocina
- Pesos
- Cinta adhesiva

Para la fabricación del FRP de vidrio desarrollamos el siguiente proceso:

Una vez se fabricaron los tejidos, con unos alicates cortamos de cada tejido 6 muestras. Recubrimos una superficie plana con papel de cocina para evitar manchar la superficie de trabajo y sobre ella colocamos las probetas con una separación mínima de 5cm. Para evitar que se muevan las probetas durante el proceso las pegamos sobre la superficie con cinta adhesiva, colocamos en cada extremo de las probetas dos tiras de no tejido de fibra de vidrio, una por encima de la probeta y otra por debajo.

Hacemos el mismo proceso para la mezcla de la resina epoxi descrita en el apartado anterior y la vertemos abundantemente sobre las tiras de fibra de vidrio colocadas sobre las probetas. Es muy importante cerciorarse de que no hay burbujas de aire entre las probetas, la fibra de vidrio y la resina epoxi ya que podría provocar deslizamientos en el ensayo de tracción.

Una vez esta toda la fibra de vidrio recubierta de la resina epoxi colocamos papel de cocina y sobre éste diferentes pesos para asegurarnos de que queda todo bien compactado durante el curado de la resina. El proceso de curación tiene un mínimo 24 a 48h dependiendo del espesor.

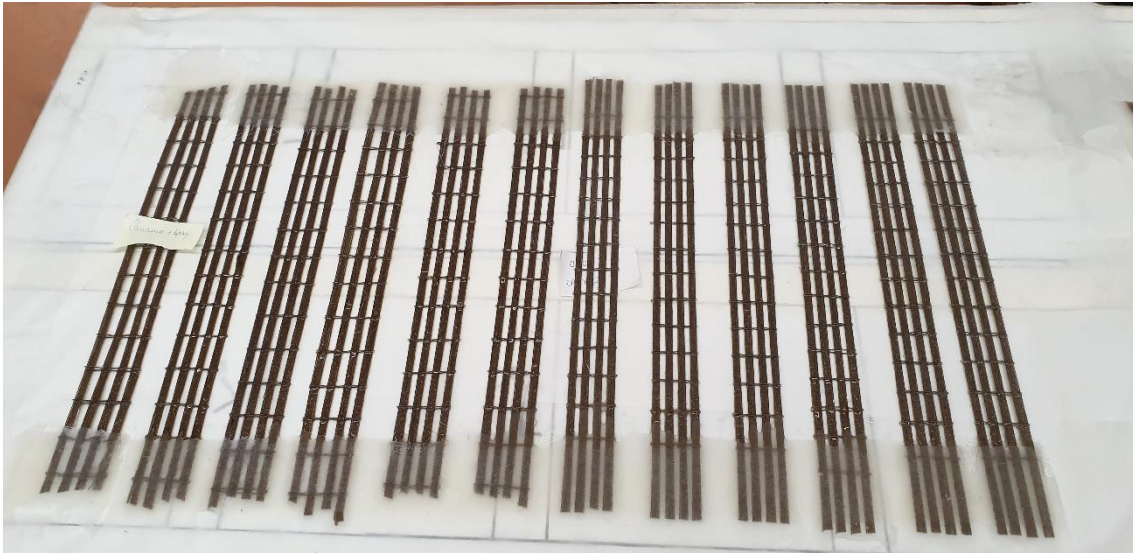


FIG. 20: FABRICACIÓN DE FRP PARA LA SUJECCIÓN DE LAS PROBETAS

2.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Para el ensayo a tracción pura de las probetas se realizará según la norma EN ISO 13934-1/2 [12]. El ensayo se llevó a cabo en una prensa electromecánica MTS Insight con capacidad máxima de 10kN. En todas las muestras se utilizaron las mismas condiciones, una precarga de 5N y una velocidad de ensayo de 5mm/min. En el ensayo aplicamos una precarga de 5N a las mallas para que estas queden bien estiradas y no haya ningún esfuerzo de compresión sobre estas.

Para asegurar de que los mechones estén bien alineados se usó un nivel láser. También se adaptó (ver utillaje en Fig. 20 y Fig. 21) un extensómetro de 25mm de rango en cada ensayo para medir las deformaciones en una longitud inicial de 50mm, con el extensómetro medimos las deformaciones de una manera más precisa que con el puente de la prensa electromecánica.

Entre el puente de la prensa electromecánica y un punto de la probeta se encuentran varias juntas mecánicas que pueden distorsionar la medida real de la deformación de la malla. Por este motivo se utiliza extensómetro, ya que mide directamente la deformación de la malla a partir de una distancia conocida, en el caso de este ensayo 50mm.

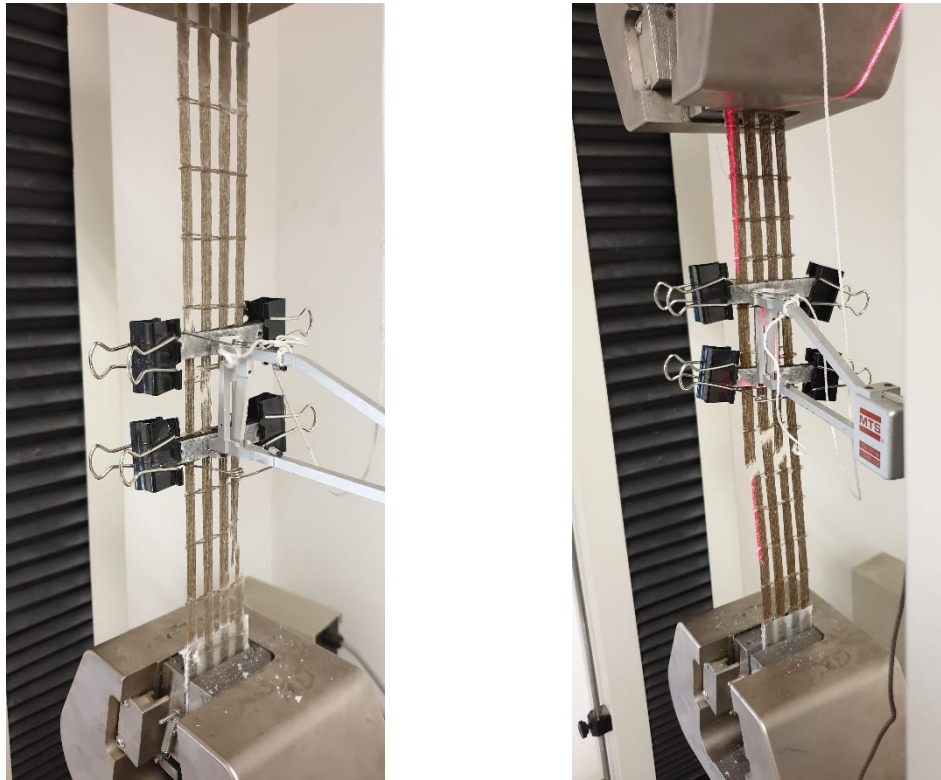


FIG. 21: CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN: MALLA DE CÁÑAMO

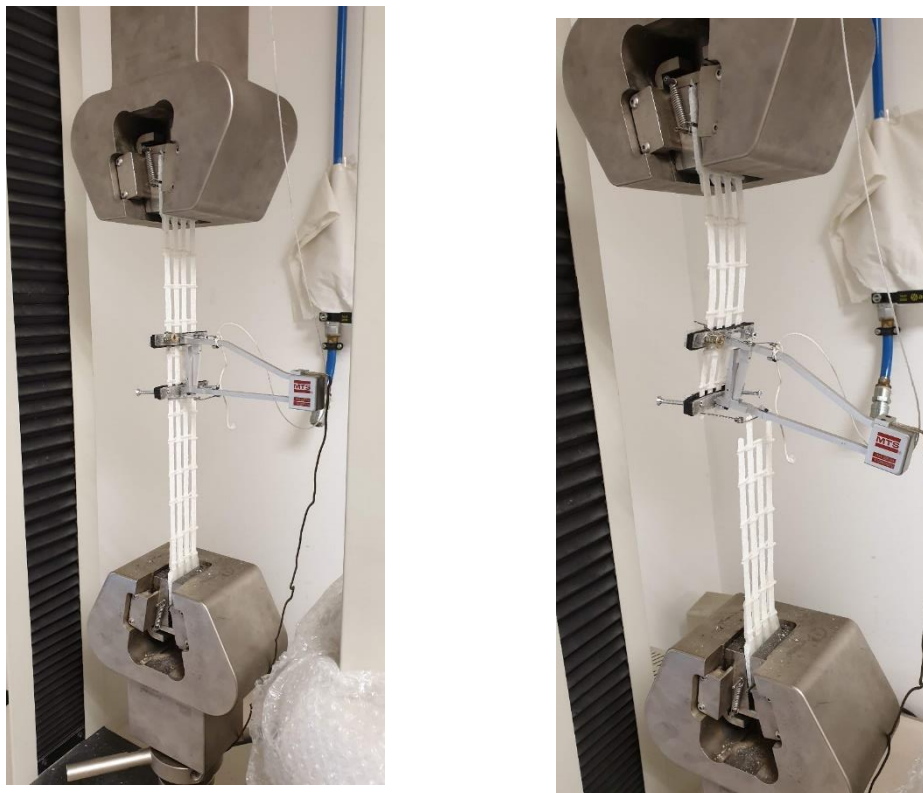


FIG. 22: CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN: MALLA DE ALGODÓN

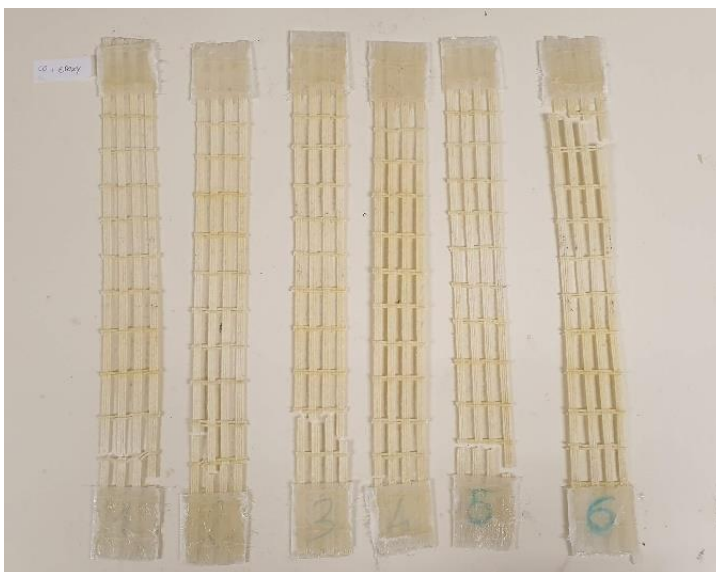
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos del ensayo a tracción de las mallas fabricadas en el proyecto y se discutirá su resultado.

3.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, presentaremos las imágenes de las mallas de fibras vegetales tras el ensayo de tracción y la curva obtenida de tensión-deformación. En el Anexo podremos encontrar las imágenes de las mallas antes del ensayo.

3.1.1. ALGODÓN/POLIÉSTER CON RESINA EPOXI



**FIG. 24: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN
CO/PES-EPOXI TEJIDO 1**



**FIG. 23: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN CO/PES-EPOXI
TEJIDO 2**

En la Fig. 23 podemos observar como la rotura de las mallas es bastante homogénea, todas las mallas han roto de manera similar, cerca de la sujeción. En la Fig. 24 observamos los mismos tipos de rotura que en la Fig. 23, la única malla de la Fig. 23 que no ha roto tan cerca de la sujeción ha sido la primera malla.

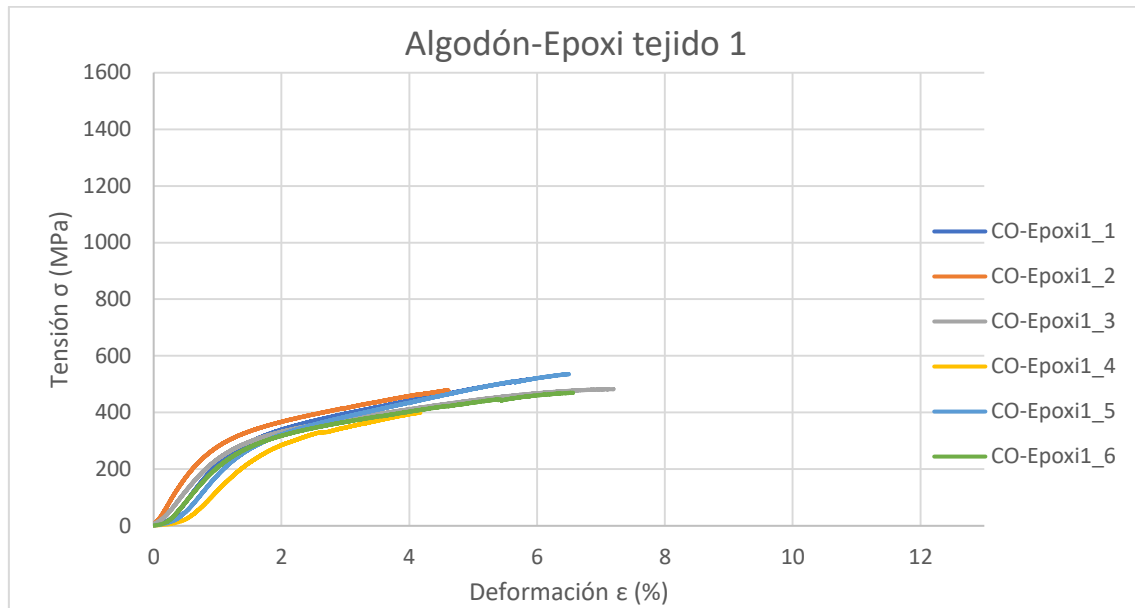


FIG. 25: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-EPOXI TEJIDO 1

En la Fig. 25 se observa que las mallas 3, 5, 6 son las que obtienen una deformación máxima mayor que las demás, siendo la malla 2 la que aguanta una carga mayor a misma deformación.

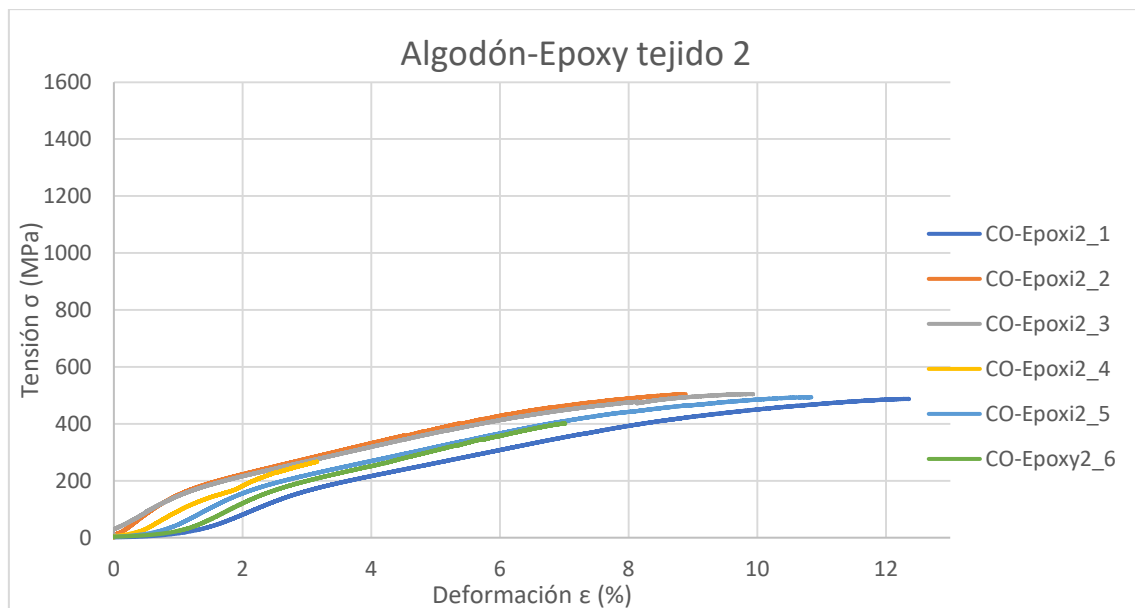


FIG. 26: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-EPOXI TEJIDO 2

Observando la Fig. 26 salta a la vista que este grupo de muestras del tejido 2 presentan unas deformaciones superiores a las deformaciones sufridas por el grupo de mallas del tejido 1 aplicando prácticamente la misma carga. La muestra 4 ha tenido un comportamiento muy rígido en comparación con las demás.

En la Fig. 25 podemos observar que las mallas de algodón presentan dos regiones elásticas, una primera región donde se alcanza una deformación alrededor de un 1% y otra región elástica hasta su rotura. Este fenómeno es debido a la recolocación de las mallas cuando estas empiezan a tener que resistir una carga. En las muestras de la Fig. 26 no se observa tan fácilmente las dos zonas elásticas mencionadas. Tanto en la Fig. 25 como en la Fig. 26 la tensión máxima llega alrededor de 500MPa.

3.1.2. ALGODÓN/POLIÉSTER CON RESINA BIOEPOXI



FIG. 27: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN CO/PES-BIOEPOXI TEJIDO 1



FIG. 28: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN CO/PES-BIOEPOXI TEJIDO 2

En la Fig. 27 observamos como en la malla 2 y 4 la rotura no se ha producido tan horizontal como en el resto y ha sido de forma más escalonada. En la Fig. 28 vemos que las roturas son bastante horizontales y en los dos tejidos las roturas se han producido muy cerca de las sujeciones.

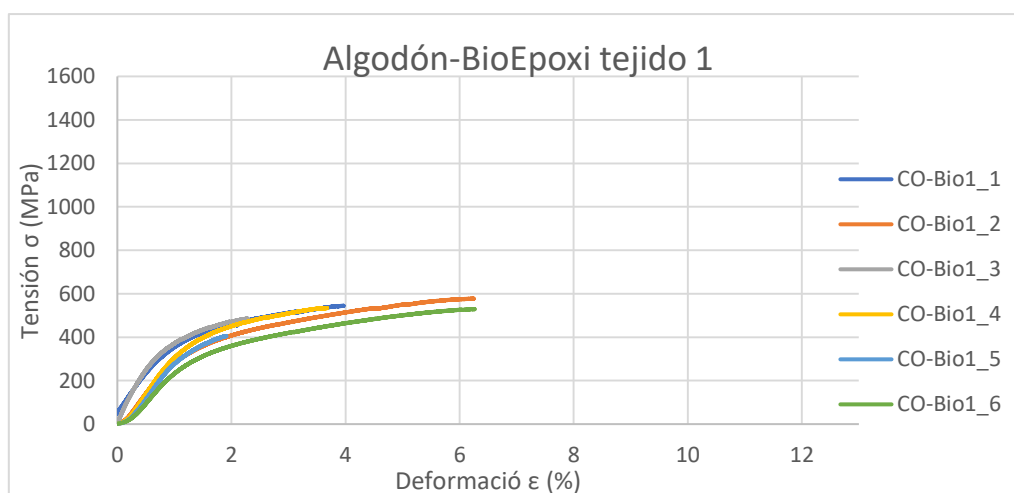


FIG. 29: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-BIOEPOXI TEJIDO 1

En la Fig. 29 las muestras 2 y 6 son las que presentan una mayor deformación del grupo y la muestra 5 presenta un comportamiento rígido en comparación con las demás.

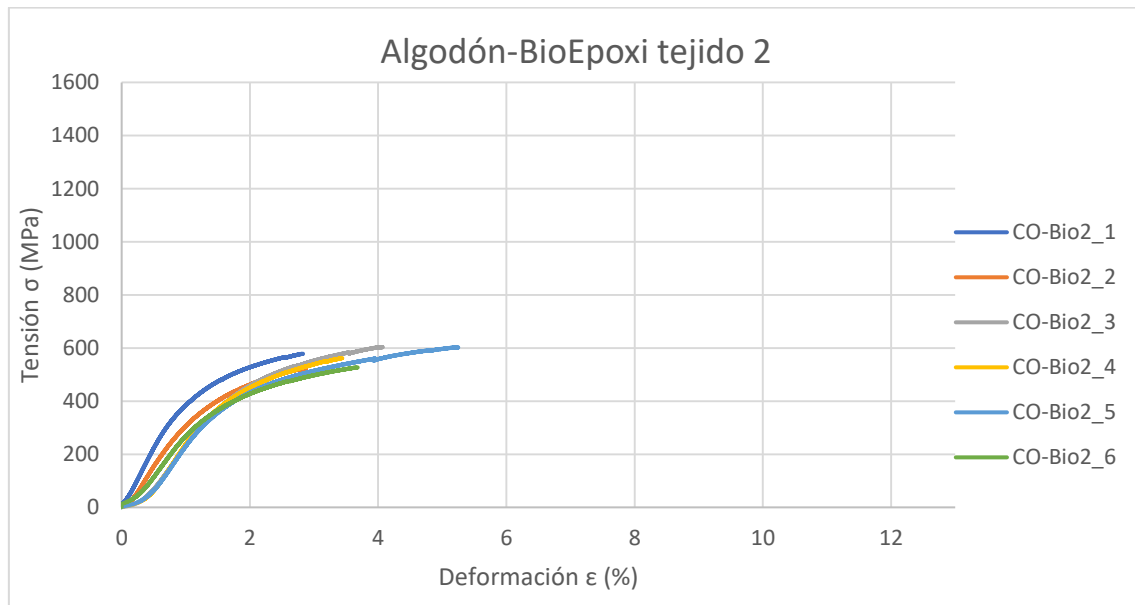


FIG. 30: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-BIOEPOXI TEJIDO 2

El grupo de muestras representado en la Fig. 30 presentan una deformación similar entorno un 2% y un 5%. La muestra 1 es la que más carga soporta a misma deformación comparado con las demás.

3.1.3. ALGODÓN/POLIÉSTER CON RESINA DE POLIÉSTER



FIG. 31: MALLAS TRAS EL ENSAYO A TRACCIÓN CO/PES-POLIÉSTER TEJIDO 1

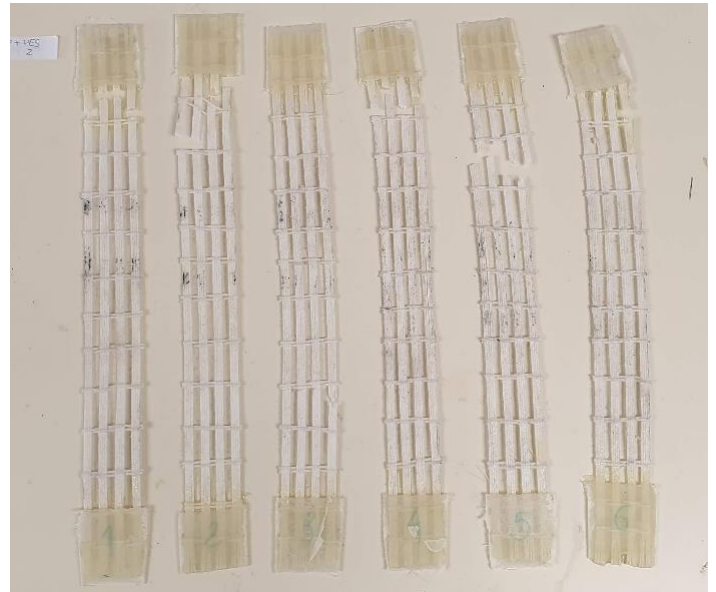


FIG. 32: MALLAS TRAS EL ENSAYO A TRACCIÓN CO/PES-POLIÉSTER TEJIDO 2

En el caso de las mallas de Algodón- poliéster recubiertas con resina de poliéster empezamos a ver como algunas muestras rompen a una distancia más alejada de la sujeción como podemos ver en la Fig. 31 las mallas 1, 2 y 5 y en la Fig. 32 la malla 5. De todas maneras, en líneas generales la rotura sigue siendo bastante horizontal y es más interesante que las roturas estuviesen más distribuidas a lo largo de toda la malla. Si la rotura se produce a lo largo de la malla de forma escalonada repartiría mejor la carga a la hora de reforzar una viga.

En la Fig. 32 observamos que en la muestra 4 un mechón de la malla ha roto antes que los demás, con lo cual significa que ese mechón soportaba un esfuerzo mayor al resto. Este hecho es bastante negativo ya que se busca que todos los mechones de la malla carguen por igual para repartir mejor el esfuerzo.

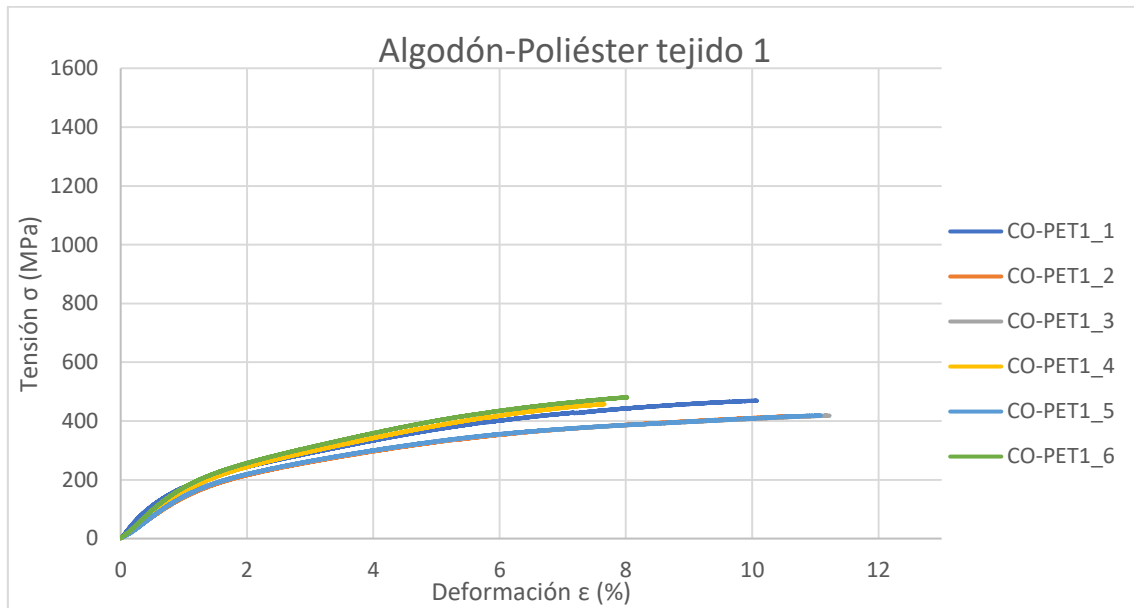


FIG. 33: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-POLIÉSTER TEJIDO 1

Observamos en la Fig. 33 que todas las curvas presentan un comportamiento bastante similar siendo la muestra 1, 2, 3 y 5 las que presentan una mayor deformación considerando las curvas 2, 3 y 5 prácticamente idénticas. El hecho de que las curvas 2, 3 y 5 se solapen nos hace indicar que las mallas del tejido son uniformes.

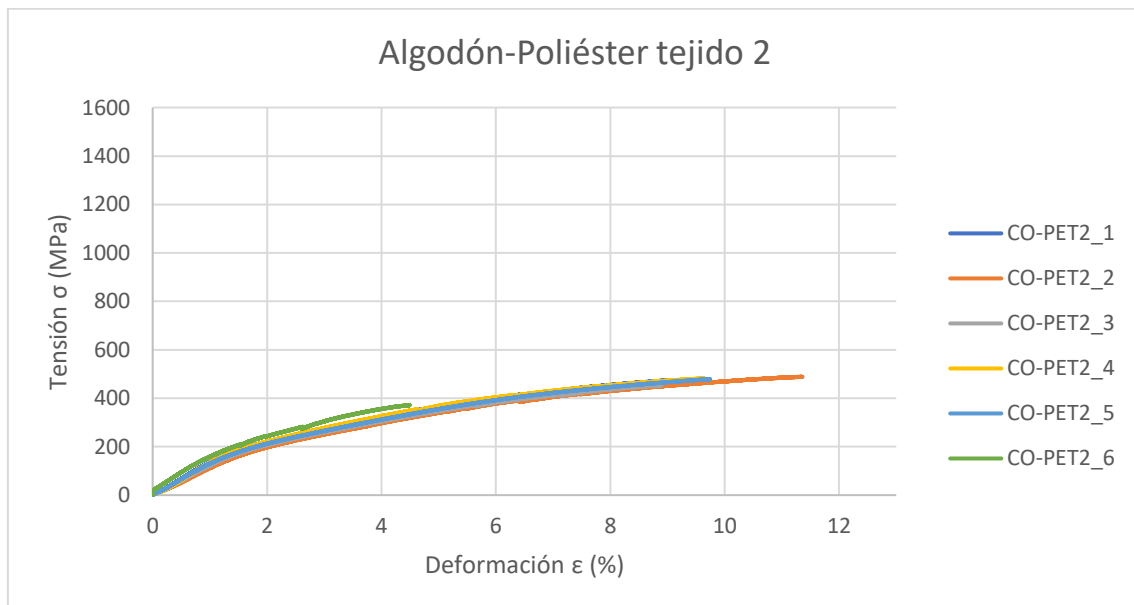


FIG. 34: CURVAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE CO/PES-POLIÉSTER TEJIDO 2

En tendencias generales en la Fig. 34 vemos como las curvas de las muestras tienen un comportamiento similar, la muestra 6 es la que presenta una máxima deformación menor con alrededor de un 4,6% mientras que las demás entorno un 10% y un 11%. En la Fig. 31

observamos como la malla 6 no rompen todos sus mechones a la vez, sino que un mechón rompe antes debido a que este soportaba más carga que los demás.

3.1.4. CÁÑAMO CON RESINA EPOXI



FIG. 35: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-EPOXI
TEJIDO 1

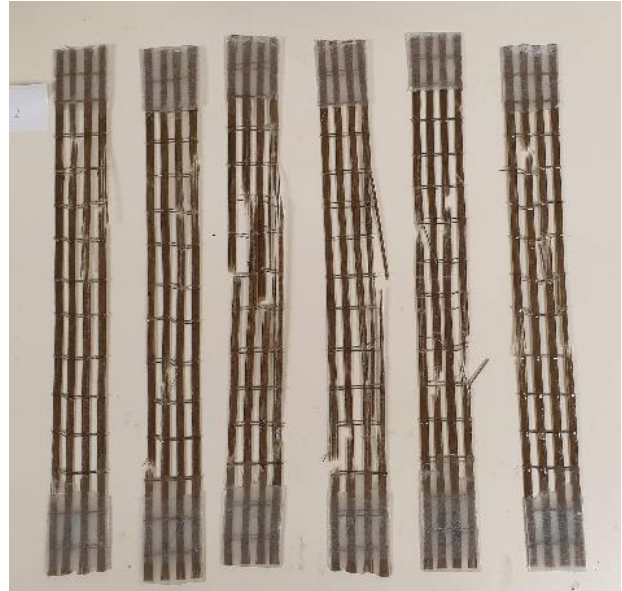


FIG. 36: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-EPOXI
TEJIDO 2

En la Fig. 35 las mallas 4 y 6 han roto justo en el borde de la sujeción, la malla 1 también, pero de un modo más escalonado. El resto de mallas 2, 3 y 5 han roto de forma distribuida a lo largo de la probeta. En cuanto al segundo tejido podemos ver en la Fig. 36 que todas han roto de forma distribuida a lo largo de la malla.

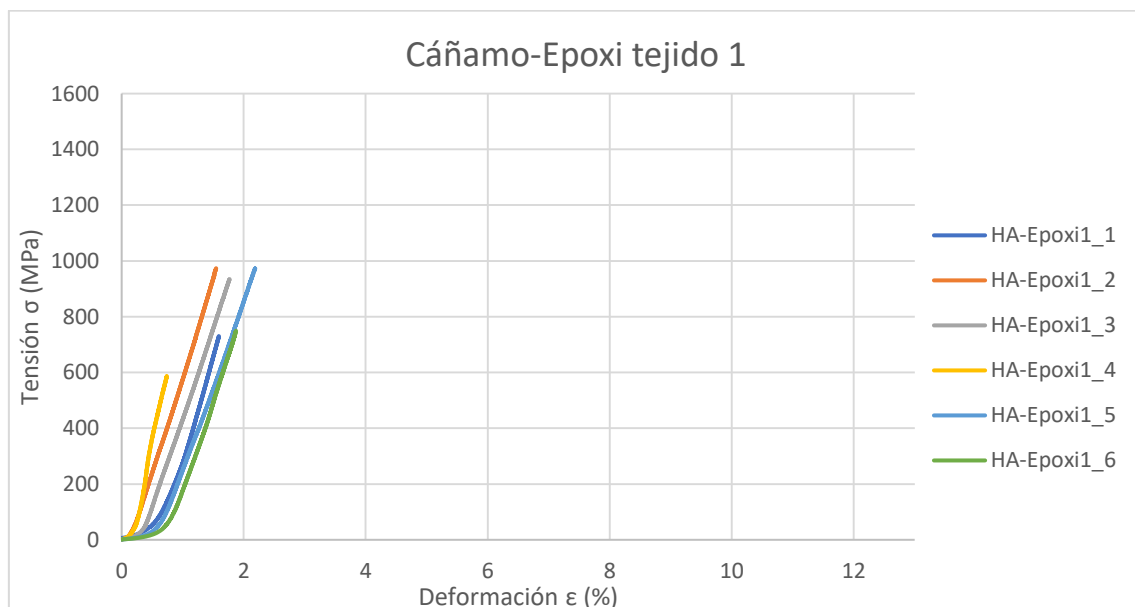


FIG. 37: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-EPOXI TEJIDO 1

En la Fig. 37 vemos como la malla 4 tiene una mayor rigidez que el resto, podemos pensar que puede ser resultado de que haya sido una de las mallas que han roto por la sujeción, sin embargo, las mallas 1 y 6 también lo han hecho y son de las mallas que menor rigidez presentan. Si nos fijamos en el gráfico podemos relacionar que las mallas 1, 4 y 6 son las que presentan una tensión de rotura menor, entonces relacionamos la rotura de los mechones en la sujeción con una merma de la tensión de rotura que pueden llegar a alcanzar.

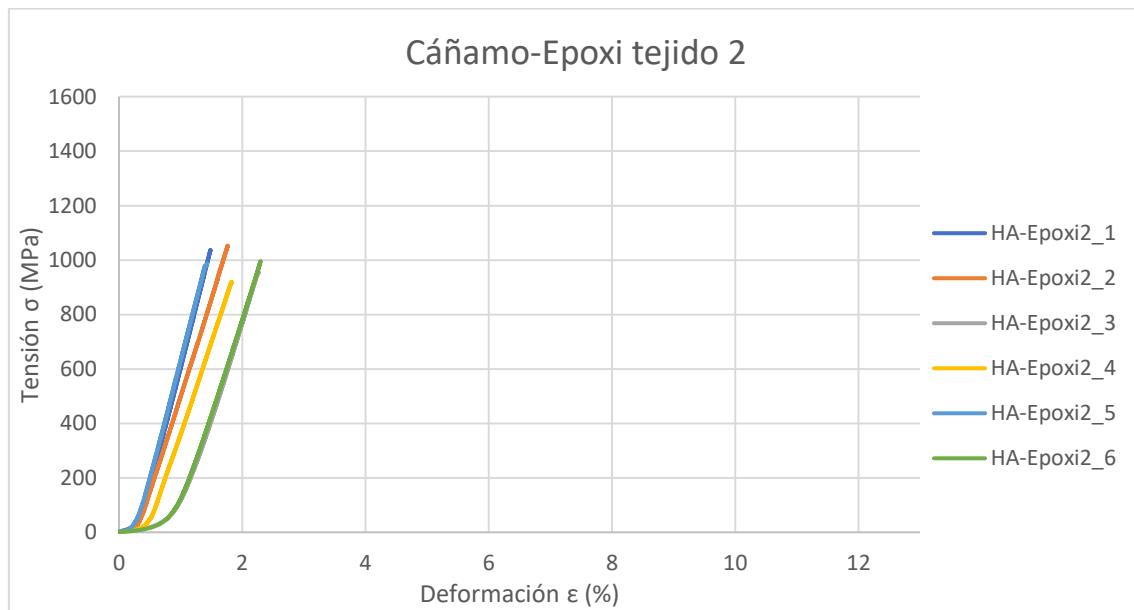


FIG. 38: CURVAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-EPOXI TEJIDO 2

En este caso se puede ver en la Fig. 38 que todas presentan una tensión máxima similar, en la Fig. 36 vemos que ninguna ha roto por la sujeción y todas han roto de forma distribuida a lo largo de la malla. Podemos decir así que una rotura cerca de la sujeción disminuye la tensión máxima a la que podría llegar la probeta.

3.1.5. CÁÑAMO CON RESINA BIOEPOXI

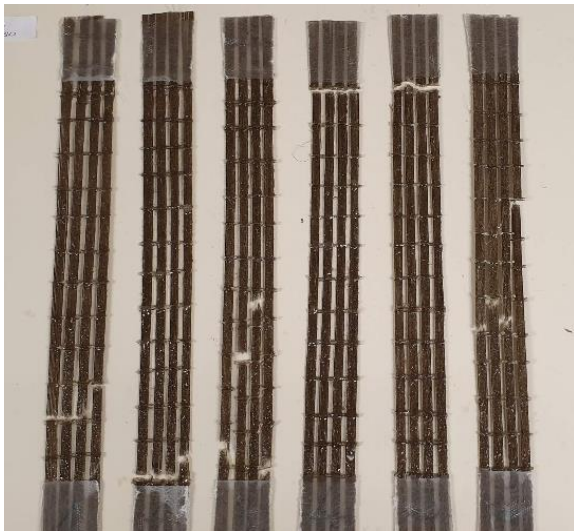


FIG. 39: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-BIOEPOXI TEJIDO 1



FIG. 40: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-BIOEPOXI TEJIDO 2

Del tejido 1 de cáñamo con resina bio-epoxi las únicas que han roto a lo largo de la malla han sido la malla 3 y 6 como muestra la Fig. 39, el resto han roto todas las mallas horizontalmente y en el borde de la sujeción. En cambio, de la Fig. 40 las únicas que han roto por el borde de la sujeción han sido las mallas 2 y 6.

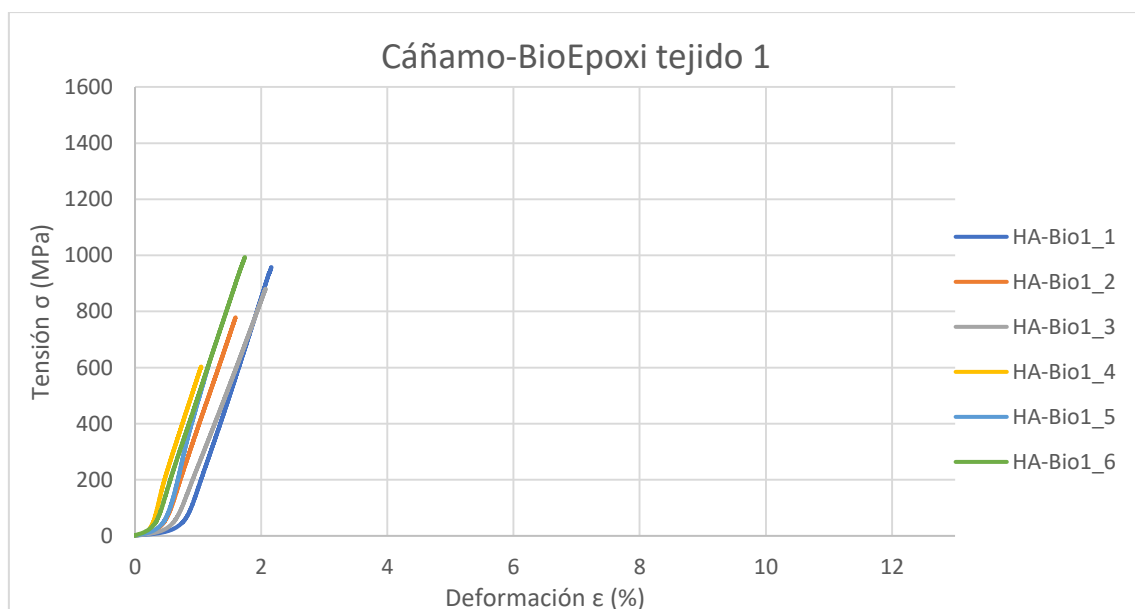


FIG. 41: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-BIOEPOXI TEJIDO 1

Vemos como todas las curvas de la Fig. 41 tiene un comportamiento muy similar, aunque la muestra 4 es la más rígida y presenta una tensión de rotura menor a las del grupo, el

comportamiento de las mallas 1 y 3 es muy similar como también lo es el comportamiento de las mallas 2 y 6 aunque la 2 presenta una tensión de rotura más baja.

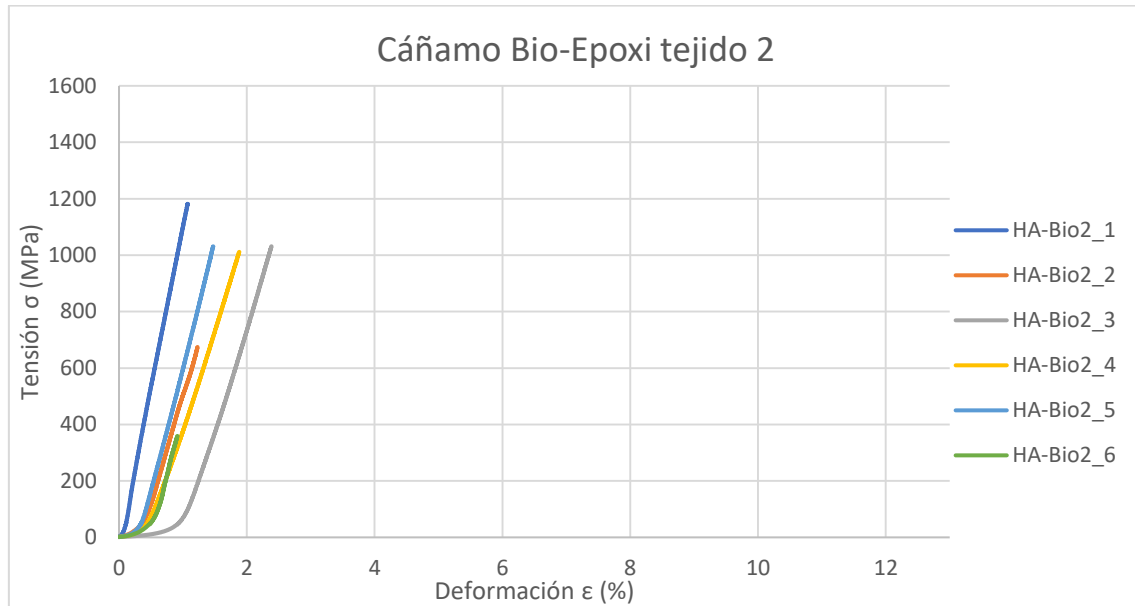


FIG. 42: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-BIOEPOXI TEJIDO 2

En este caso observamos en la Fig. 42 que el módulo de elasticidad difiere en el conjunto de mallas. La malla 6 presenta una tensión máxima muy por debajo del resto, en la Fig. 40 vemos como esta malla ha roto justo por la sujeción.

3.1.6. CÁÑAMO CON RESINA DE POLIÉSTER

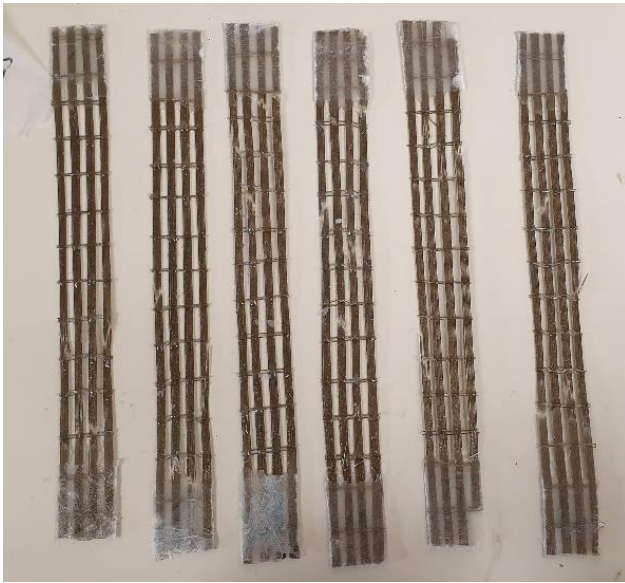


FIG. 43: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-POLIÉSTER
TEJIDO 1

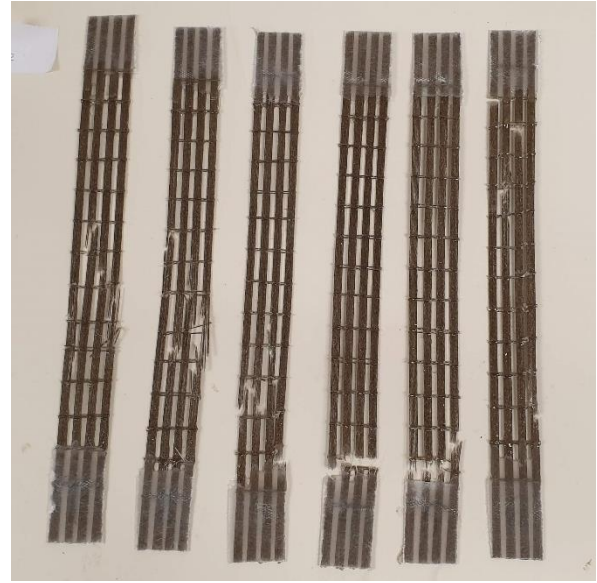


FIG. 44: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN HA-POLIÉSTER
TEJIDO 2

Podemos ver en la Fig. 43 como todas las mallas han roto a lo largo de las probetas con roturas distribuidas a diferencia de las mallas del tejido 2, que como podemos ver en la Fig. 44 las mallas 4, 5 y 6 han roto cerca de la sujeción.

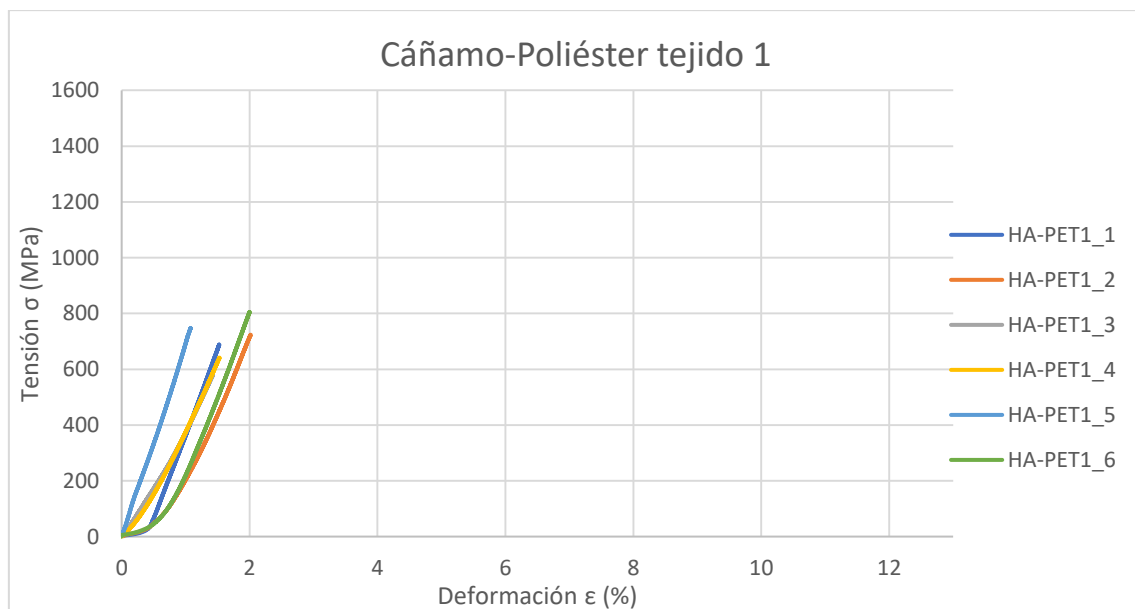


FIG. 45: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-POLIÉSTER TEJIDO 1

En la Fig. 45 podemos observar como la malla 5 es la que presenta mayor rigidez con una menor deformación máxima, siendo la segunda con la tensión máxima. Las mallas 1 y 4 presentan un comportamiento similar, así como las mallas 2 y 6.

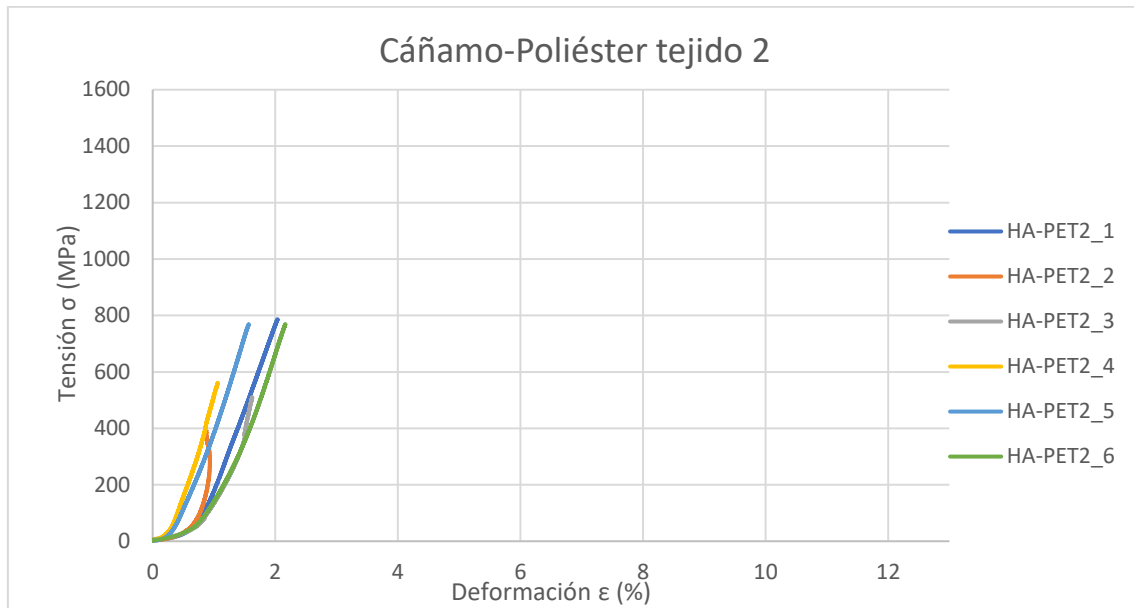


FIG. 46: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE HA-POLIÉSTER TEJIDO 2

En la Fig. 46 vemos como las curvas de las mallas 2 y 3 presentan un ligero retroceso en la deformación antes de romper, puede ser debido a una mala colocación de la muestra en la prensa electromecánica o bien una mala colocación del extensómetro. Las muestras 2, 3 y 4 presentan una tensión máxima inferior a las demás.

3.1.7. LINO CON RESINA EPOXI

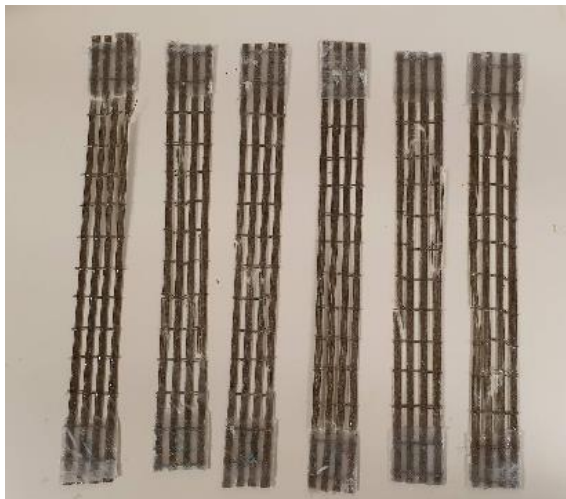


FIG. 47: MALLAS TRAS EL ENSAYO A TRACCIÓN LI-EPOXI
TEJIDO 1

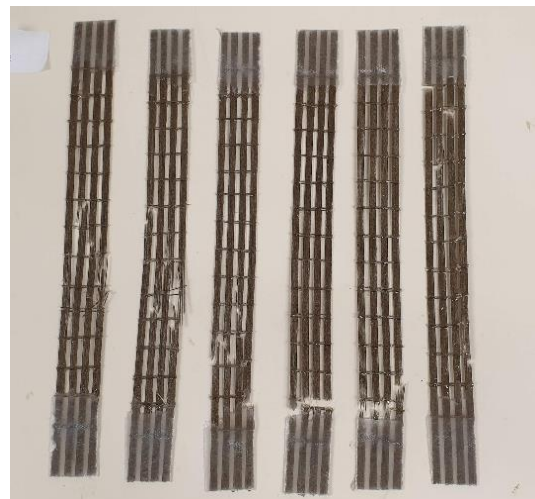


FIG. 48: MALLAS TRAS EL ENSAYO A TRACCIÓN LI-EPOXI
TEJIDO 2

Del primer tejido vemos en la Fig. 47 que las mallas 1 y 4 han roto cerca de la sujeción y en la Fig. 48 vemos que las mallas 4, 5 y 6 también. En la Fig. 48 vemos como de la segunda malla, el cuarto mechón ha roto con más fuerza, probablemente estaba aguantando más carga que los demás. Las demás mallas han roto de manera distribuida a lo largo de ellas.



FIG. 49: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LI-EPOXI TEJIDO 1

En este caso vemos en la Fig. 49 como la muestra 4 presenta la máxima deformación a la rotura, la muestra 5 presenta la tensión máxima del grupo, aunque la malla más rígida es la 3. En el caso de la muestra 1 también apreciamos que sufre un retroceso en la curva alrededor de los 550MPa debido a una mala colocación, puede ser debido también a que uno de los mechones era el encargado de sufrir toda la carga y después las demás se recolocaron también para seguir cargando con el esfuerzo de tracción.

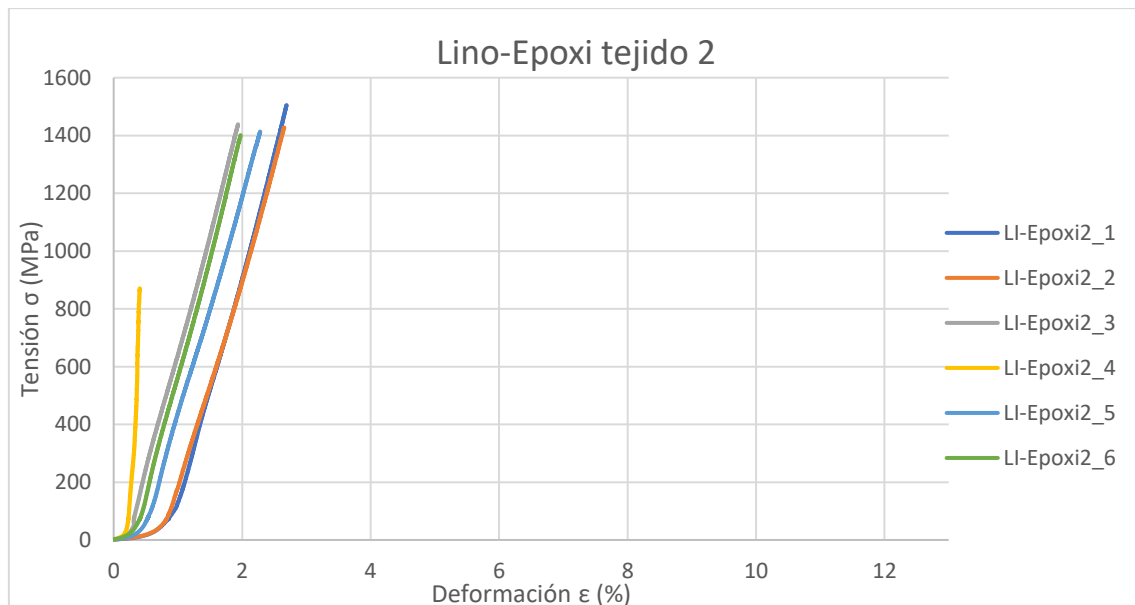


FIG. 50 CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LI-EPOXI TEJIDO 2

3.1.8. LINO CON RESINA BIOEPOXI



FIG. 51: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN LI-BIOEPOXI TEJIDO 1



FIG. 52: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN LI-BIOEPOXI TEJIDO 2

En la Fig. 50 vemos como la malla 1 y 4 rompen cerca de la sujeción así como la malla 1, 4 y 6 de la Fig. 51. Las demás mallas rompen de manera más distribuida.

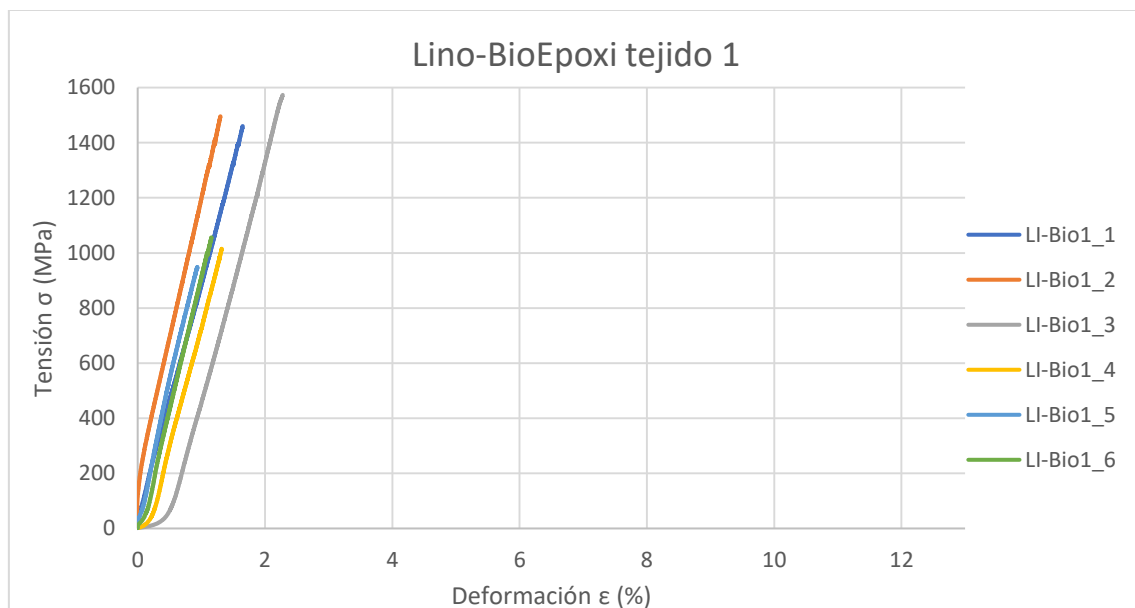


FIG. 53: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LI-BIOEPOXI TEJIDO 1

Las curvas de las mallas 4, 5 y 8 que se observan en la Fig. 52 presentan los valores mínimos de tensión a la rotura alrededor de 1000MPa y las mallas 1, 2 y 3 los valores máximos de tensión a la rotura sobre los 1500MPa. También se observa que el módulo de elasticidad de las 6 mallas es muy parecido ya que se observan casi paralelas, también presentan un comportamiento muy similar.

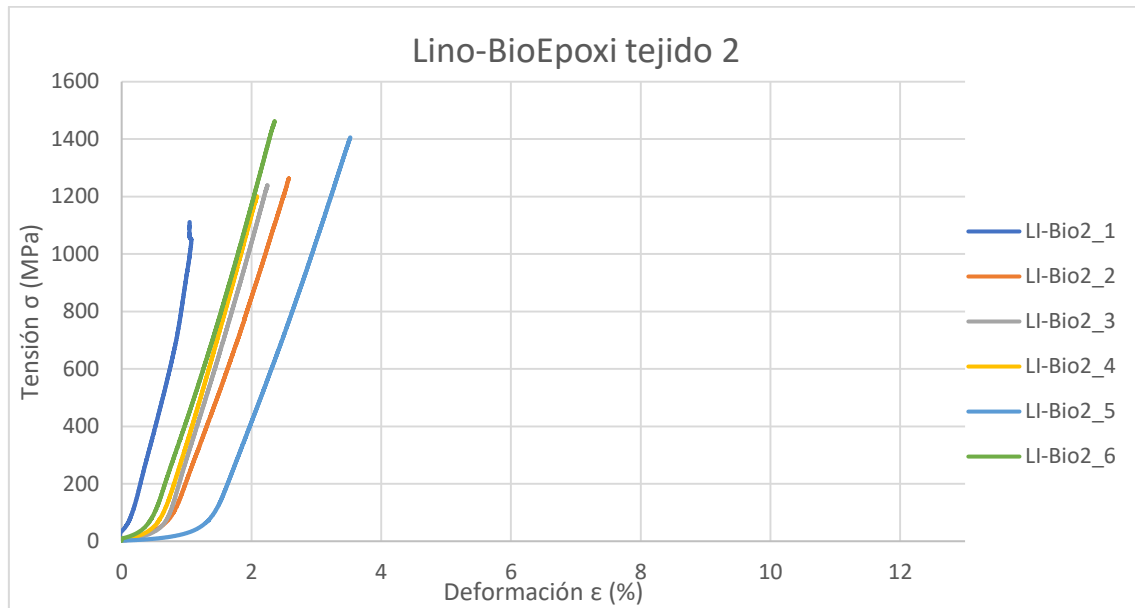


FIG. 54: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN LI-EPOXI TEJIDO 2

3.1.9. LINO CON RESINA DE POLIÉSTER



FIG. 55: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN LI-POLIÉSTER TEJIDO 1



FIG. 56: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN LI-POLIÉSTER TEJIDO 2

En la Fig. 53 se observa como la malla 3 ha roto por los dos mechones exteriores, significando que estos soportaban una carga mayor que los dos mechones centrales que casi no han roto. También la malla 4 de la misma figura ha roto muy cerca de la sujeción. En la Fig. 54 la malla 2 y 3 han roto cerca de la sujeción y las demás se ve como los mechones rotos soportaban una mayor carga que los demás porque la resta de mechones están casi intactos.



FIG. 57: CURVAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN LI-POLIÉSTER TEJIDO 1

Vemos en la Fig. 55 que las mallas 1 y 4 son las que menor tensión de rotura tienen con un valor de 800MPa siendo la malla 1 la más rígida y las demás varían en torno los 1200-1300MPa. Encontramos que la malla 5 es la más flexible.

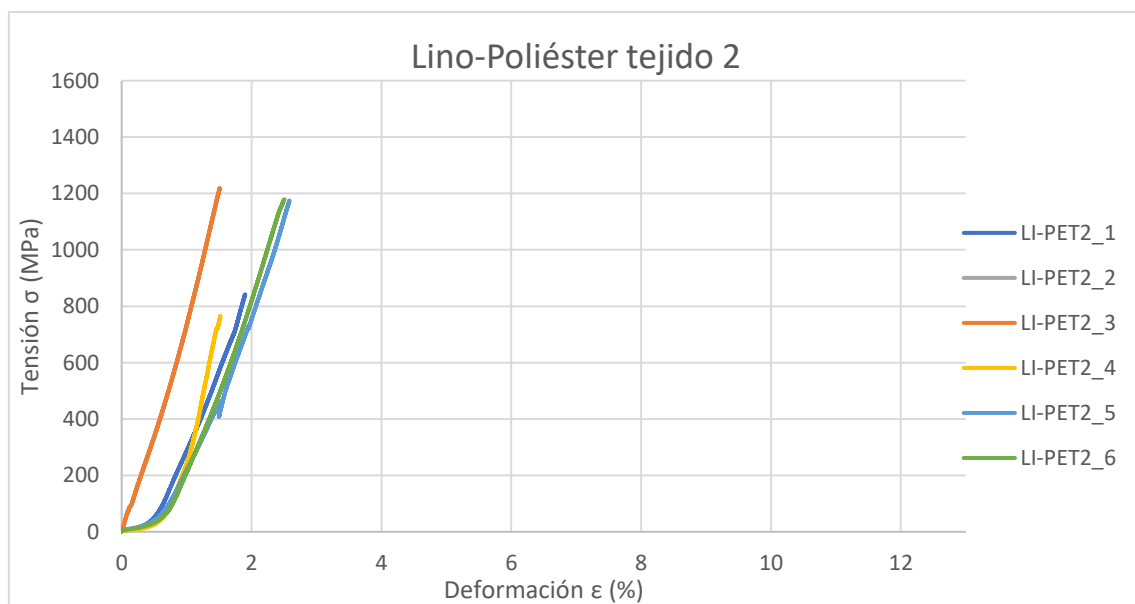


FIG. 58: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LI-POLIÉSTER TEJIDO 2

Las mallas 3, 5 y 6 de la Fig. 56 son las que presentan una mayor tensión de rotura, aunque la 3 es la más rígida con diferencia del conjunto. Las demás mallas tienen un comportamiento similar, las mallas 1, y 4 tienen la menor tensión de rotura en torno a unos 800MPa. Observamos que la malla 4 es la que mayor módulo de elasticidad presenta siendo más vertical que el resto.

3.1.10. SISAL CON RESINA EPOXI



FIG. 59: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-EPOXI TEJIDO 1



FIG. 60: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-EPOXI TEJIDO 2

En la Fig. 57 observamos que la malla 1 ha roto con violencia y la malla 5 ha roto muy cerca de la sujeción. En la Fig. 58 vemos que la malla 1 ha roto cerca de la sujeción. Si comparamos las imágenes de las mallas de sisal con las imágenes del resto de materias podemos apreciar que son mallas más rígidas ya que al romper se descolocan los hilos de trama y la malla casi no se deshace.



FIG. 61: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-EPOXI TEJIDO 1

Según vemos en la Fig. 59 todas las mallas presentan casi la misma tensión de rotura entorno los 800MPa a diferencia de la malla 1 y la malla 5. La malla 1 presenta una tensión de rotura

sobre los 900MPa y la malla 5 bastante más baja que las del grupo con 400MPa. En la Fig. 57 podemos ver que la malla 5 es la que ha roto cerca de la sujeción. Vemos que las mallas presentan diferentes módulos de elasticidad siendo la malla 4 la que presenta un módulo de elasticidad menor con una mayor deformación máxima.

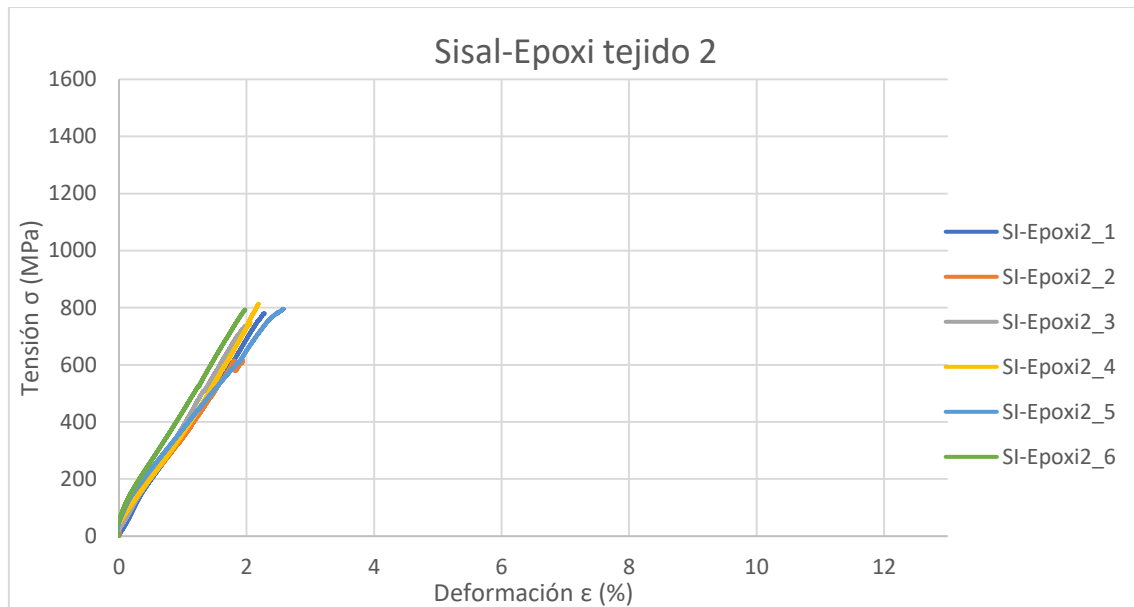


FIG. 62: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-EPOXI TEJIDO 2

En este caso podemos ver en la Fig. 60 que todas las curvas de tensión deformación el mismo comportamiento y adquieren prácticamente el mismo módulo de elasticidad, tensión de rotura 800MPa y una deformación máxima del 2%.

3.1.11. SISAL CON RESINA BIOEPOXI



FIG. 64: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-BIOEPOXI TEJIDO 1



FIG. 63: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-BIOEPOXI TEJIDO 2

Tanto en la Fig. 61 como en la Fig. 62 observamos que las mallas han roto a lo largo de su extensión, aunque en todas algunos mechones han roto cerca de la sujeción. Si nos fijamos en la Fig. 61 la malla 6 ha roto solo en los dos mechones derechos cerca de la sujeción, los mechones mencionados habrán aguantado más carga que el resto.



FIG. 65: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-BIOEPOXI TEJIDO 1

Observamos en la Fig. 63 que los gráficos tienen una tendencia similar al principio del ensayo, pero a medida que se va aumentando la carga estos se van dispersando obteniendo diferentes deformaciones máximas.

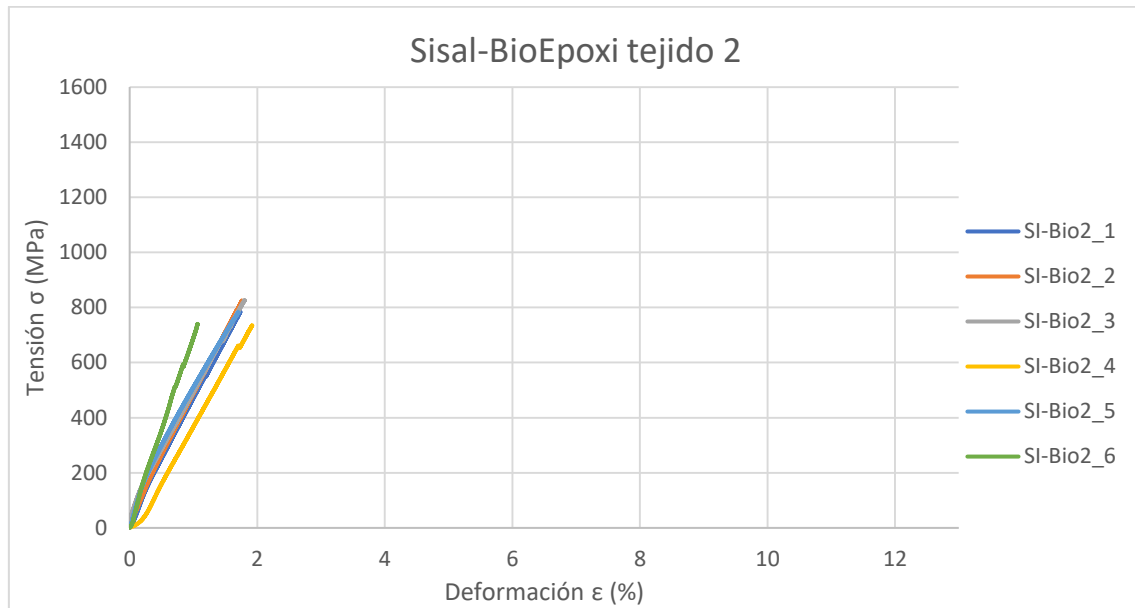


FIG. 66: CURVAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-BIOEPOXI TEJIDO 2

En la Fig. 64 observamos que las mallas 1, 2, 3 y 5 presentan una gran uniformidad en su comportamiento, la malla 6 es la más rígida del conjunto y la malla 2 la más flexible presentando una mayor deformación en la rotura y un menor módulo elástico.

3.1.12. SISAL CON RESINA DE POLIÉSTER



FIG. 67: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-POLIÉSTER TEJIDO 1



FIG. 68: MALLAS TRAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN SI-POLIÉSTER TEJIDO 2

Podemos observar que las mallas de la Fig. 65 han roto por a lo largo de ellas, lo mismo pasa con las mallas de la Fig. 66 aunque en la malla 6 de esta figura se ve como han roto todos los mechones a la misma altura y muy cerca de la sujeción.

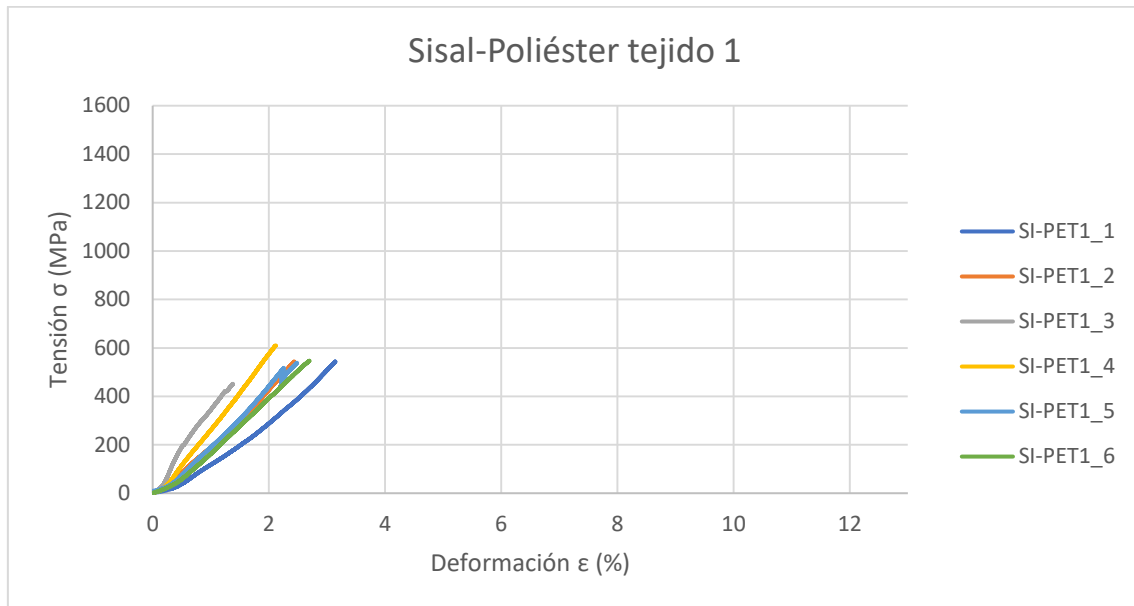


FIG. 69: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-POLIÉSTER TEJIDO 1

Observando el gráfico de la Fig. 67 vemos que la malla 3 es la más rígida de las mallas del primer tejido de fibras de sisal con recubrimiento de resina de poliéster. La malla 3 tiene una tensión de rotura y una deformación inferior a las demás con un módulo de elasticidad mayor. La malla 6 es la única del grupo que llega a una tensión de rotura de 600MPa y la malla 1 es la más flexible de todas teniendo una mayor deformación máxima.

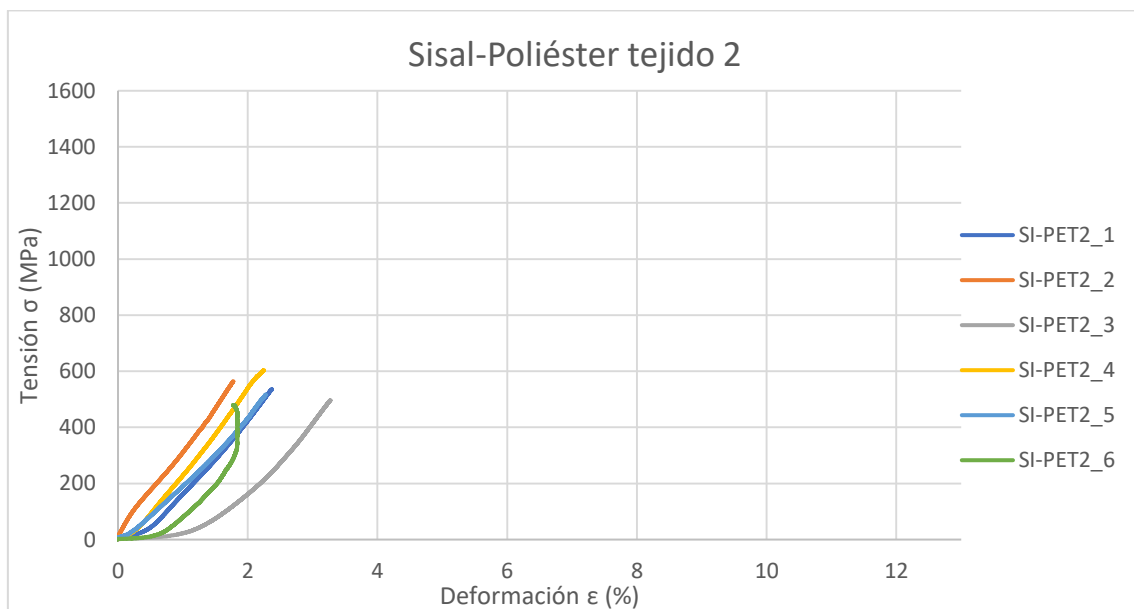


FIG. 70: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE SI-POLIÉSTER TEJIDO 2

En la Fig. 68 vemos como la malla 6 de la Fig. 66 sufre una regresión en su gráfica debido a la mala rotura que ha tenido en el ensayo de tracción rompiendo por la sujeción debido al deslizamiento de las mallas. También observamos que la malla 3 es la más flexible del grupo

teniendo una deformación máxima mayor. Las demás probetas tienen un comportamiento similar entre ellas.

3.2. CLASIFICACIÓN DE FALLAS

En el apartado anterior hemos visto las imágenes de todas las roturas de las mallas ensayadas, al comentar su rotura se detecta que hay varios tipos de rotura repetitivas, por ese motivo se harán dos clasificaciones. La primera clasificación será dependiendo del lugar de la malla donde rompe la malla y la segunda si es una rotura de un mechón o de toda la malla:

- Según el lugar donde se produce la rotura:
 - **Rotura en la sujeción:** cuando se produce la rotura en la sujeción indica que la fabricación de esta no se hizo de forma correcta. En la fabricación de la sujeción de las mallas es muy importante que no se formen burbujas de aire ni en la aplicación ni la curación de la resina epoxi resoltech. Las burbujas de aires debilitan la interacción del material compuesto entre la malla y la resina con la fibra de vidrio facilitando un posible deslizamiento en el ensayo. Ejemplo: Fig. 27 todas las mallas menos la 2ª, Fig. 51 4ª malla, entre otras
 - **Rotura localizada:** tipo de rotura donde todos los mechones rompen a la misma altura. Este tipo de rotura es más común en las mallas de algodón, puede ser debido a que como el algodón es un material más flexible y tiene más capacidad para deformarse, la estricción del material se produce de manera más gradual y las moléculas tienen más tiempo para “recolocarse” antes de la rotura y luego romper. Ejemplo: Fig. 31 1ª malla y 5ª malla.
 - **Rotura deslocalizada:** se trata de justo lo contrario al tipo de rotura mencionada antes. Si nos fijamos este tipo de rotura se produce en los materiales más rígidos, con un módulo de elasticidad más alto. En las mallas más rígidas la rotura se produce más repentina sin las moléculas haber tenido tiempo a recolocarse entonces rompen en lugares más aleatorios o donde haya una irregularidad. Ejemplo: Fig. 35 5ª malla y Fig. 40 1ª malla.
- Según la repartición de la tensión en la malla:
 - **Los mechones no cargan por igual:** en este caso la adherencia entre la sujeción y los mechones de la malla no es homogénea por burbujas, grosor excesivo de la sujeción o un grosor fino de la sujeción y hay uno o algunos mechones mejor adheridos, por tanto, al transmitir el esfuerzo por las mordazas los mechones

mejor adheridos cargan más que los demás. Ejemplo: Fig. 48 1ª malla y Fig. 53 1ª malla.

- **Los mechones cargan por igual:** situación ideal, cuando todos los mechones de la malla se distribuyen la tensión y rompen. Ejemplo: Fig. 58 3ª, 4ª malla y Fig. 61 6ª malla.

3.3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado relacionaremos los resultados del ensayo de tracción obtenidos entre las diferentes materias algodón/poliéster, cáñamo, lino y sisal. Así como también relacionaremos los resultados entre las diferentes resinas aplicadas epoxi, bio-epoxi y poliéster. En los siguientes apartados las tablas mostradas reflejan los promedios de las propiedades mecánicas, para ver los valores obtenidos en un ensayo en concreto ver el documento Anexo.

En el apartado anterior hemos estudiado el gráfico de tensión deformación por cada grupo de 6 mallas (cada tejido), por tanto, en los siguientes gráficos de tensión-deformación de este apartado nos concentraremos más en analizar la variación entre muestras.

3.3.1. COMPARATIVA DE RESULTADOS DE ALGODÓN/POLIÉSTER

TABLA 27: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN ALGODÓN/POLIÉSTER

		E1 Tejido 1 (MPa)	E2 Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E1 Tejido 2 (MPa)	E2 Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Resina Epoxi	\bar{X} :	270,003	41,636	480,003	5,823	113,297	37,989	442,817	8,699
	S:	41,363	8,985	46,922	1,190	23,008	16,966	94,637	3,256
	CV (/):	0,153	0,216	0,098	0,204	0,203	0,447	0,214	0,374
Resina Bio-Epoxi	\bar{X} :	356,764	67,139	512,646	4,059	359,235	65,168	566,100	3,690
	S:	65,009	29,306	60,215	1,875	56,204	18,891	35,178	0,899
	CV (/):	0,182	0,437	0,117	0,462	0,156	0,290	0,062	0,244
Resina de Poliéster	\bar{X} :	151,673	21,655	443,177	9,789	131,392	31,434	457,965	8,876
	S:	21,744	8,019	29,056	1,565	12,002	9,514	43,942	2,315
	CV (/):	0,143	0,370	0,066	0,160	0,091	0,303	0,096	0,261

Como podemos ver en la Tabla 27. el primer módulo elástico que obtenemos del ensayo de las mallas de algodón/poliéster tiene un valor más alto que el segundo módulo elástico encontrado. Debido a que en el primer tramo de la curva de tensión-deformación la rigidez es mayor, en este tramo las fibras de las mallas se recolocan y ofrecen una mayor rigidez al esfuerzo al que se están viendo sometidas. En el segundo tramo la rigidez disminuye, así como su módulo elástico ya que las empiezan a sufrir deformaciones mayores con una menor carga aplicada.

Encontramos que el tejido que obtiene los dos módulos elásticos más altos es el recubierto con resina bio-epoxi, seguido de la resina epoxi y por último la resina de poliéster, debido a que las resinas epoxi son más rígidas que la resina de poliéster. Con esta observación podemos decir que el recubrimiento de bio-epoxi es el que aporta más rigidez al algodón y la resina de poliéster es la que aporta más flexibilidad a las mallas de algodón.

En cuanto a la tensión última el algodón no se ve afectado por el tipo de resina aplicada, los valores son muy similares, ligeramente superiores los proporcionados por la resina Bio-Epoxi. Por tanto, si deseamos una malla de algodón para el refuerzo de una estructura y la solicitud de la malla es aguantar el máximo de carga posible será muy poca la diferencia que encontramos entre los tres tipos de resina.

Donde encontramos más variación es en la deformación máxima de las mallas. Que oscila entre un 3,690% y 9,789%. La resina que más capacidad de deformación aporta es la resina de poliéster y la resina epoxi en el primer conjunto de mallas nos ha dado una deformación de (5,823%) mientras que en el segundo conjunto de mallas ha otorgado una deformación mayor (8,699%). Como hemos dicho antes, la resina de poliéster es la más flexible por tanto hace aumentar la deformación máxima de la malla. Esta característica será útil si necesitamos una malla de algodón para un refuerzo estructural donde se solicite disipar la energía de la estructura por ejemplo, sometida a cargas dinámicas. malla de algodón para un refuerzo estructural donde se solicite disipar la energía de la estructura por ejemplo sometida a cargas dinámicas.

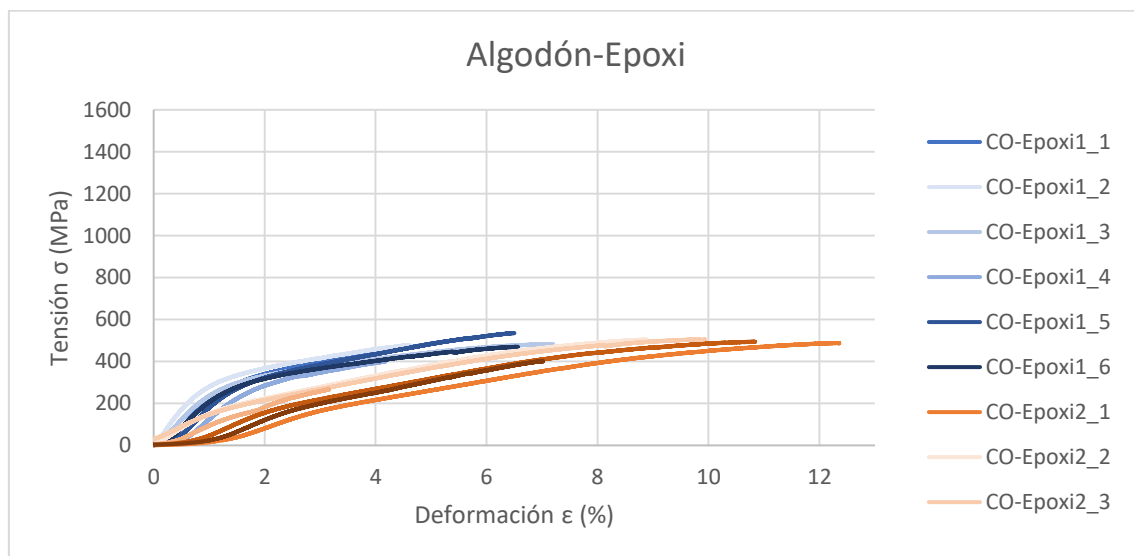


FIG. 71: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN CO/PES-EPOXI

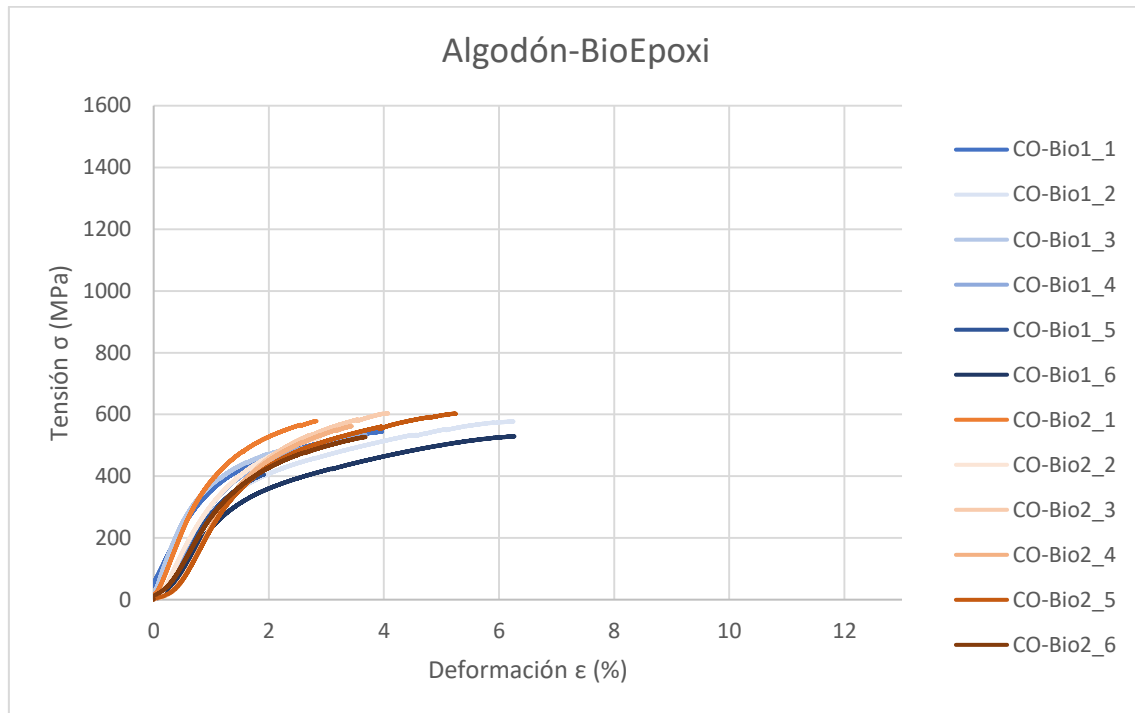


FIG. 72: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN CO/PES-BIOEPOXI

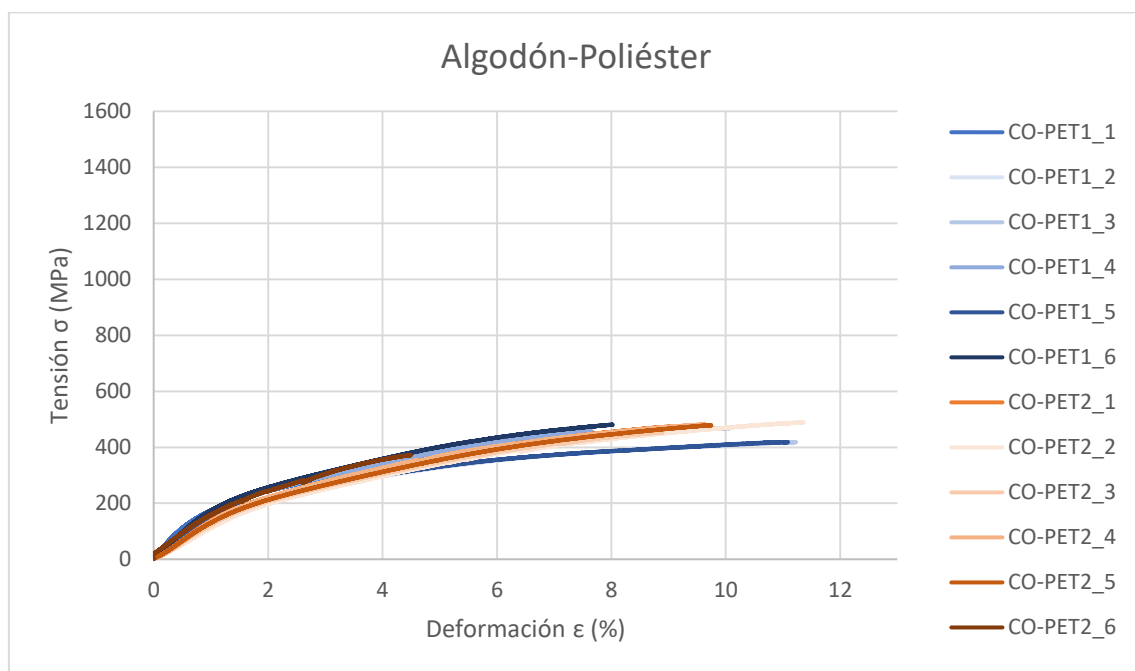


FIG. 73: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN CO/PES-POLIÉSTER

En la Fig. 69 observamos que las mallas del primer grupo con epoxi obtienen una mayor rigidez mientras que el segundo grupo obtiene mayor capacidad de deformación. En el caso de la resina de bio-epoxi Fig. 70 ha sucedido lo contrario, las mallas procedentes del segundo tejido obtienen una mayor rigidez y el primer grupo obtiene una mayor capacidad de deformación, aunque esta diferencia con la resina bio-epoxi no es tan acusada como con la resina epoxi. Esta diferencia de comportamiento entre los tejidos recubiertos de la misma resina puede ser debido al error

experimental que podemos cometer al tejer la malla y al impregnarla de resina ya que observando la Fig. 71 los dos grupos de mallas recubiertas de resina de poliéster son más uniformes. En este caso para el algodón, la resina de poliéster es la resina que nos proporciona mayor uniformidad en los resultados de las muestras. A parte de poder observarlo en la Fig. 71 se puede observar a través del coeficiente de variación en la Tabla 27.

3.3.2. COMPARATIVA DE RESULTADOS DE CÁÑAMO

TABLA 28: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN CÁÑAMO

		E Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Resina Epoxi	\bar{X} :	725,985	824,428	1,619	754,003	991,544	1,846
	S:	166,812	159,842	0,487	95,593	49,616	0,371
	CV (/):	0,230	0,194	0,301	0,127	0,050	0,201
Resina Bio-Epoxi	\bar{X} :	693,263	803,268	1,630	835,707	881,577	1,493
	S:	86,933	170,691	0,457	166,685	305,860	0,554
	CV (/):	0,125	0,212	0,280	0,199	0,347	0,371
Resina de Poliéster	\bar{X} :	552,048	697,263	1,596	693,484	633,129	1,553
	S:	104,541	80,340	0,360	161,202	163,202	0,516
	CV (/):	0,189	0,115	0,225	0,232	0,258	0,332

Observando la Tabla 28. apreciamos que obtenemos valores muy similares entre el tejido 1 y el tejido 2. Los valores del módulo de elasticidad del conjunto de muestras del segundo tejido tratadas con resina de poliéster se solapan con los resultados obtenidos en el conjunto de muestras del primer tejido usando resina bio-epoxi. Los valores obtenidos por los dos conjuntos de muestras de cáñamo tratados con epoxi se encuentran entre los valores obtenidos por los dos grupos de cáñamo tratados con bio-epoxi. Con lo cual nos planteamos que la variabilidad de las prestaciones mecánicas del cáñamo no se ven muy afectadas por el tipo de resina que usemos.

Si nos fijamos en el apartado anterior los valores del módulo elástico del algodón se veían hasta doblados según la resina que usáramos. En el caso del cáñamo, los valores de rigidez aumentan si usamos una resina más rígida como la resina epoxi o bio-epoxi, pero la diferencia en su rigidez no es tan grande. Este hecho puede ser debido a que ninguna de estas resinas es la óptima para aumentar la rigidez el cáñamo o bien, que el algodón absorbe más resina que el cáñamo y por eso vemos el módulo de elasticidad más variable dependiendo la resina que usemos.

En la tensión máxima encontramos que tanto la resina epoxi como bio-epoxi influyen del mismo modo mientras que la resina de poliéster proporciona valores más bajos en los dos conjuntos

de muestras. Curiosamente, los valores de deformación máxima son para los tres tipos de resinas aplicadas en los tejidos de cáñamo bastante similares.

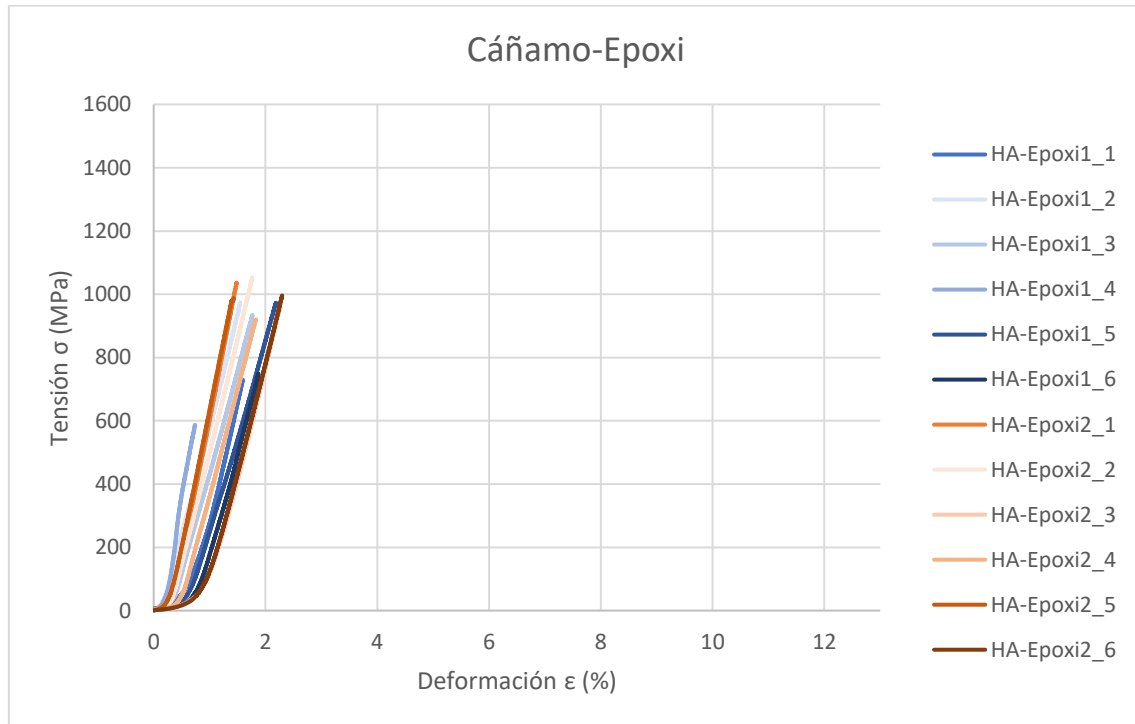


FIG. 74: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN HA-EPOXI

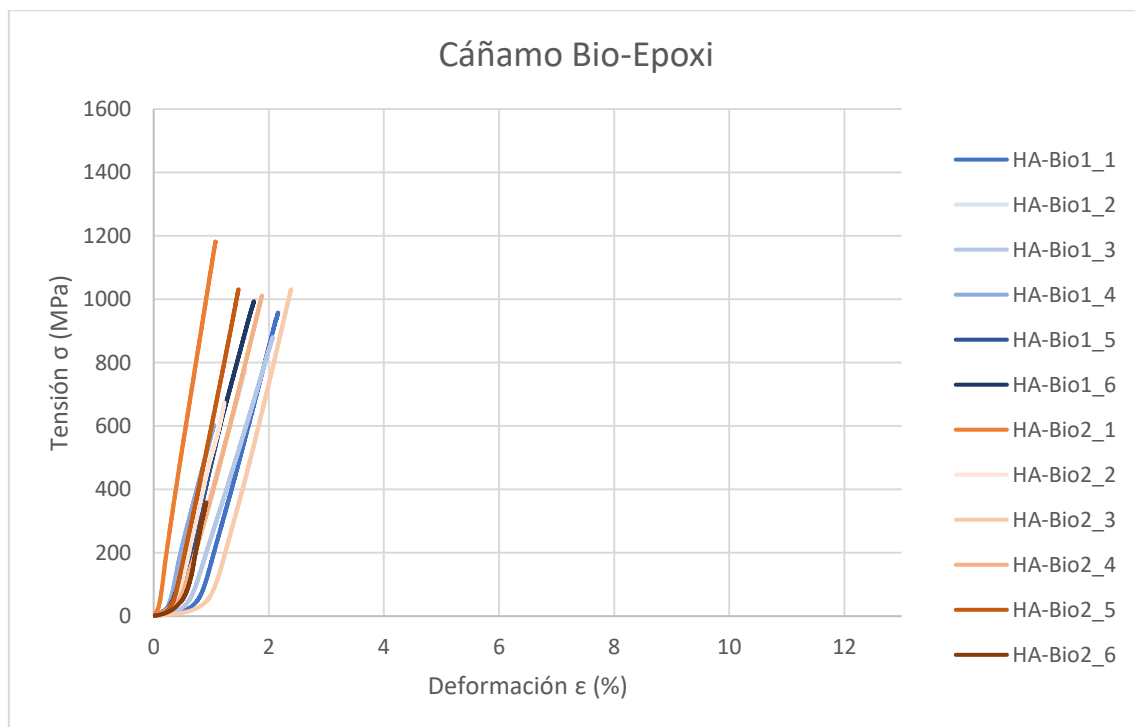


FIG. 75: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN HA-BIOEPOXI

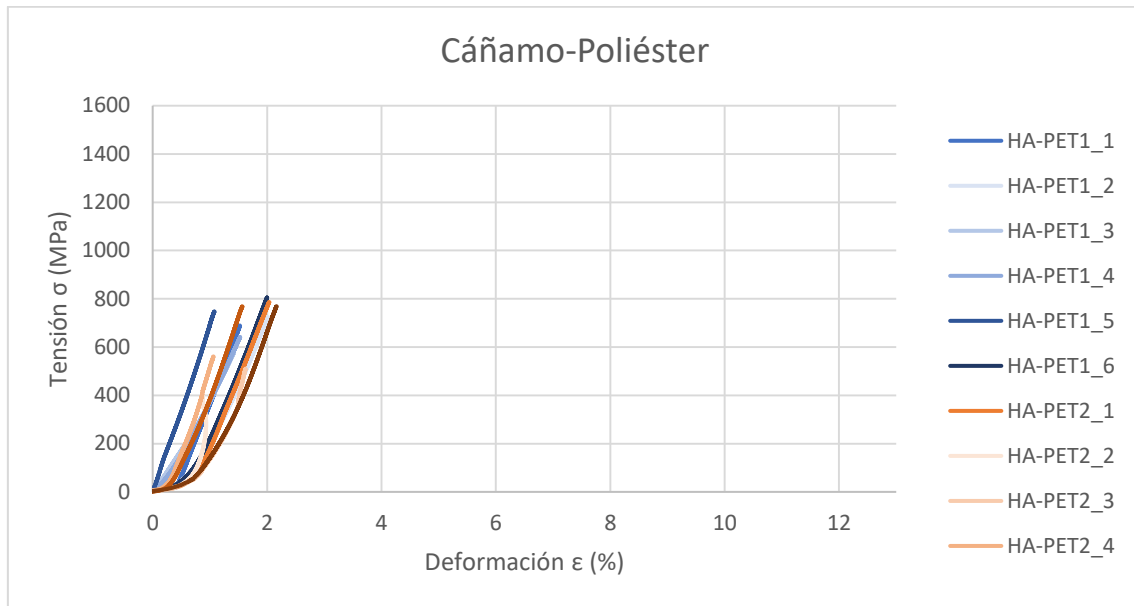


FIG. 76: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN HA-POLIÉSTER

Vemos en las Fig. 72, 73 y 74 que las gráficas de tensión-deformación de las mallas procedentes del primer tejido y las mallas procedentes del segundo tejido se solapan bastante bien en la aplicación de cada una de las resinas, esto nos indica que el error experimental cometido en la fabricación de las mallas de cáñamo es bajo y los resultados serán más fieles.

3.3.3. COMPARATIVA DE RESULTADOS DE LINO

TABLA 29: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN LINO

		E Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Resina Epoxi	\bar{X} :	837,967	1283,698	1,750	1169,159	1342,625	1,991
	S:	164,896	169,445	0,423	938,704	234,033	0,839
	CV (/):	0,197	0,132	0,242	0,803	0,174	0,422
Resina Bio-Epoxi	\bar{X} :	937,211	1258,178	1,441	743,826	1280,566	2,307
	S:	81,594	280,090	0,471	100,106	130,838	0,799
	CV (/):	0,087	0,223	0,327	0,135	0,102	0,346
Resina de Poliéster	\bar{X} :	776,603	1111,556	1,868	733,844	1000,835	1,962
	S:	92,503	239,787	0,533	169,645	210,125	0,476
	CV (/):	0,119	0,216	0,286	0,231	0,210	0,243

En este caso si observamos la Tabla 29. apreciamos como en el caso del cáñamo, no existe mucha variabilidad en las características mecánicas aplicando una resina u otra. Las fibras de lino como las fibras cáñamo proceden de la misma parte de la planta, el tallo y las fibras de algodón provienen del fruto de la planta, es posible pensar que el lino y el cáñamo tengan una capacidad de absorción diferente que la del algodón. Por ese motivo vemos tanta diferencia en las

características mecánicas según la resina aplicada, y no tanta diferencia en el caso del cáñamo y lino. Aunque también es posible pensar que ni las resinas epoxi ni la de poliéster sean las óptimas para el recubrimiento del cáñamo y lino. Igualmente obtenemos valores más que aceptables para su uso en el refuerzo de estructuras, sobre todo para necesidades de un refuerzo rígido. Los refuerzos rígidos pueden ser muy útiles para ayudar a la estructura a incrementar su rigidez, por ejemplo, para reducir la flecha en una viga de hormigón armado. La estructura en si ya es rígida y con un refuerzo rígido aportaría una rigidez extra útil cuando la flecha puede ser grande.

Podemos conseguir un módulo elástico ligeramente superior con la combinación de lino epoxi que con la combinación lino con bio-epoxi y la que menor rigidez obtiene es la combinación de lino con poliéster. Igualmente, las mallas del primer tejido con poliéster y las mallas del segundo tejido tratadas con bio-epoxi presentan un módulo elástico muy similar. Como hemos dicho anteriormente las resinas más rígidas como epoxi y bio-epoxi incrementan el módulo elástico de la malla, lo mismo pasa con la flexibilidad de la resina de poliéster aportando una mayor capacidad de deformación. El resultado de la tensión de rotura por la aplicación de Epoxi o Bio-Epoxi es muy similar entre ellas, y menor en el caso de la aplicación de poliéster. Los resultados de elongación máxima son muy similares en las aplicaciones de las tres resinas.

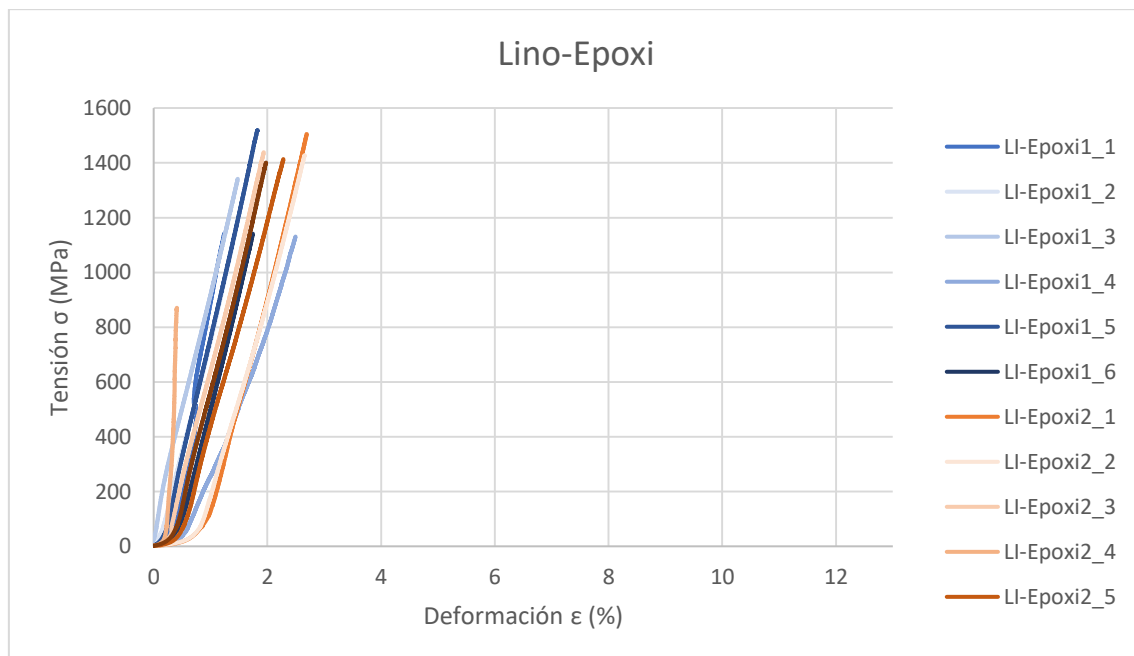


FIG. 77: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN LI-EPOXI

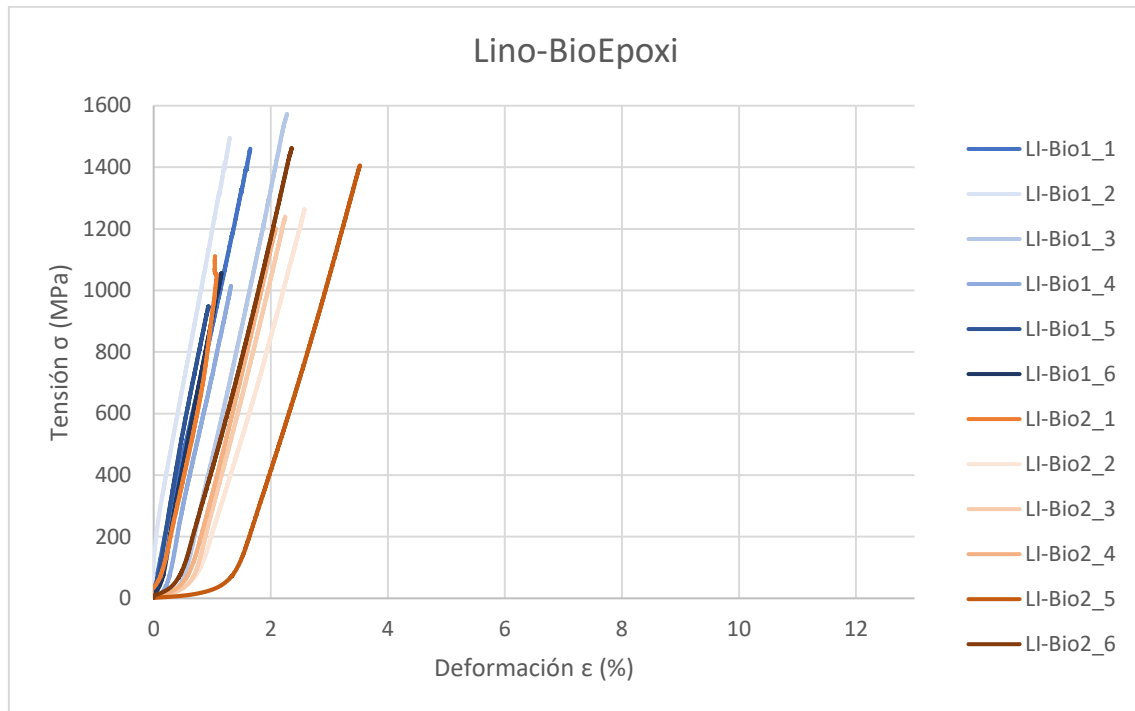


FIG. 78: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN LI-BIOEPOXI

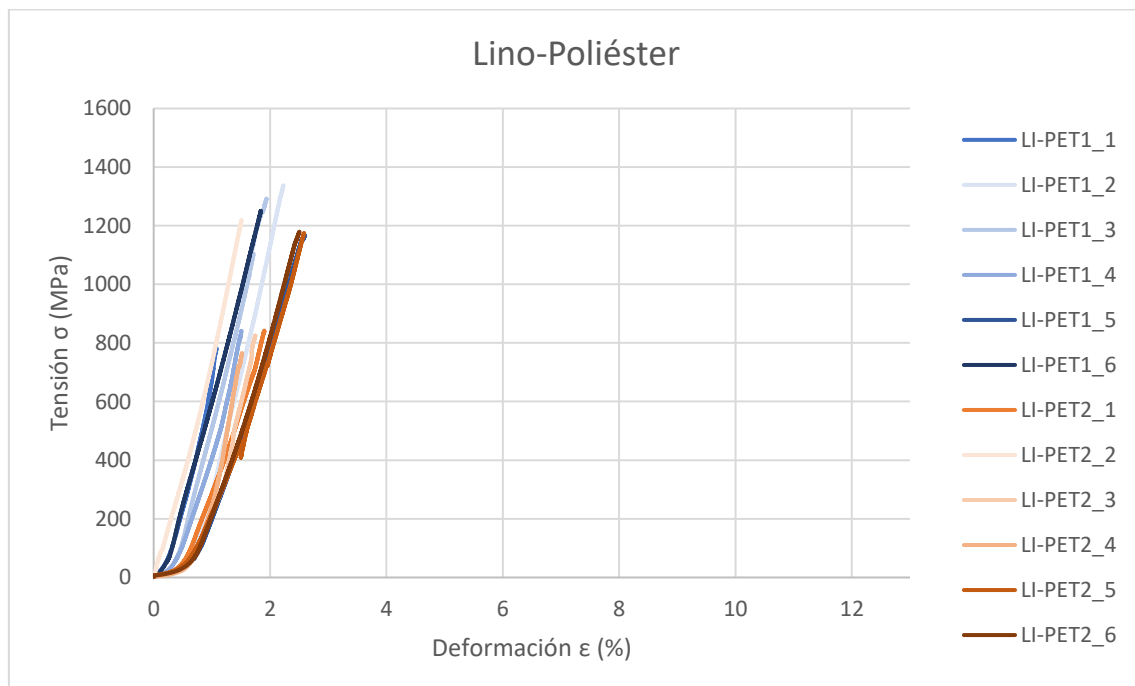


FIG. 79: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN LI-POLIÉSTER

Si observamos la Fig. 75 vemos que las curvas obtenidas por los dos tejidos en la combinación Lino-Epoxi se solapan más que en las Fig. 76 y Fig. 77 donde el primer tejido en los dos casos obtiene menores deformaciones.

3.3.4. COMPARATIVA DE RESULTADOS DE SISAL

TABLA 30: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN SISAL

		E Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Resina Epoxi	\bar{X} :	426,595	772,080	1,715	346,674	756,260	2,162
	S:	85,014	83,278	0,530	40,552	73,132	0,246
	CV (/):	0,199	0,108	0,309	0,117	0,097	0,114
Resina Bio-Epoxi	\bar{X} :	431,561	750,660	1,695	461,356	782,130	1,665
	S:	95,166	45,902	0,398	103,103	39,283	0,304
	CV (/):	0,221	0,061	0,235	0,223	0,050	0,183
Resina de Poliéster	\bar{X} :	263,689	538,879	2,377	267,717	532,570	2,289
	S:	52,157	50,677	0,594	28,451	45,721	0,549
	CV (/):	0,198	0,094	0,250	0,106	0,086	0,240

Comparando los resultados de la Tabla 30. Volvemos a encontrar mucha similitud entre la resina epoxi y bio-epoxi siendo esta última ligeramente más rígida que la primera. Este hecho nos indica que las dos resinas epoxi a grandes rasgos aportan las mismas características a las mallas, y que el contenido biológico de la resina bio-epoxi no impide estar a la altura de la resina epoxi derivada de fuentes no renovables. Las dos aportan rigidez a las mallas y el uso de una u otras estará más relacionado por factores externos como económicos y ambientales.

En este caso, con las mallas de sisal, la resina de poliéster aporta flexibilidad, obteniendo una mayor deformación en la rotura y un módulo de elasticidad menor que los otros dos recubrimientos. También el recubrimiento de poliéster hace disminuir la tensión de rotura del sisal que usando el recubrimiento de resina Epoxi o Bio-Epoxi.

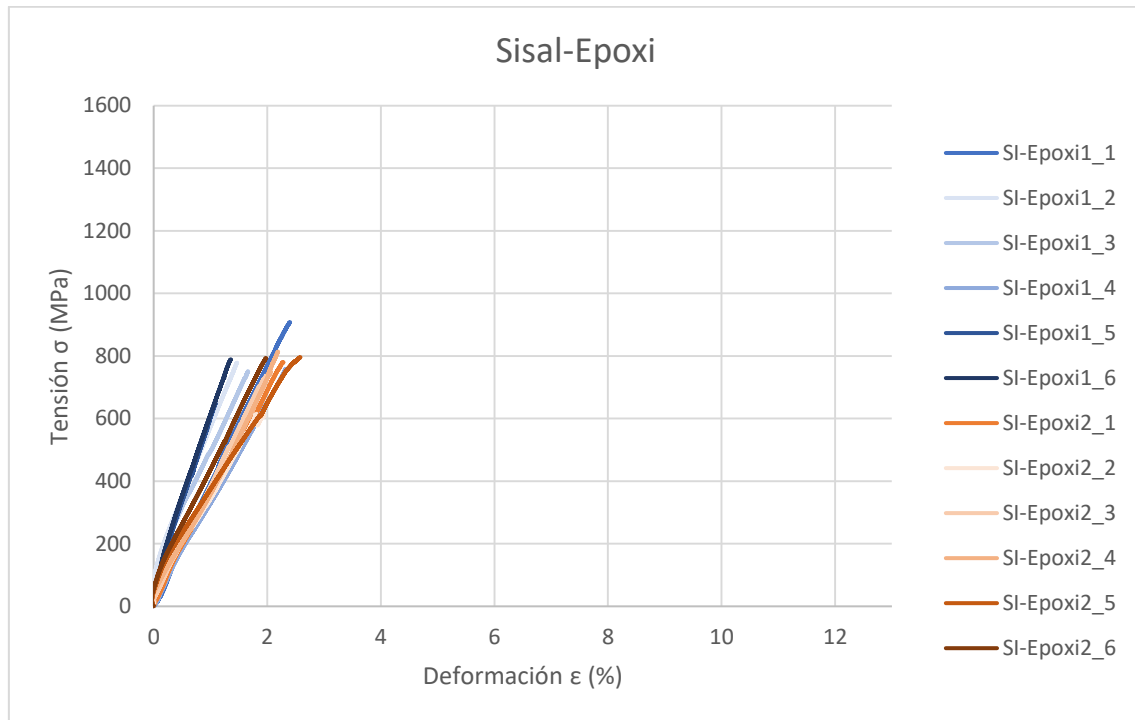


FIG. 80: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN SI-EPOXI

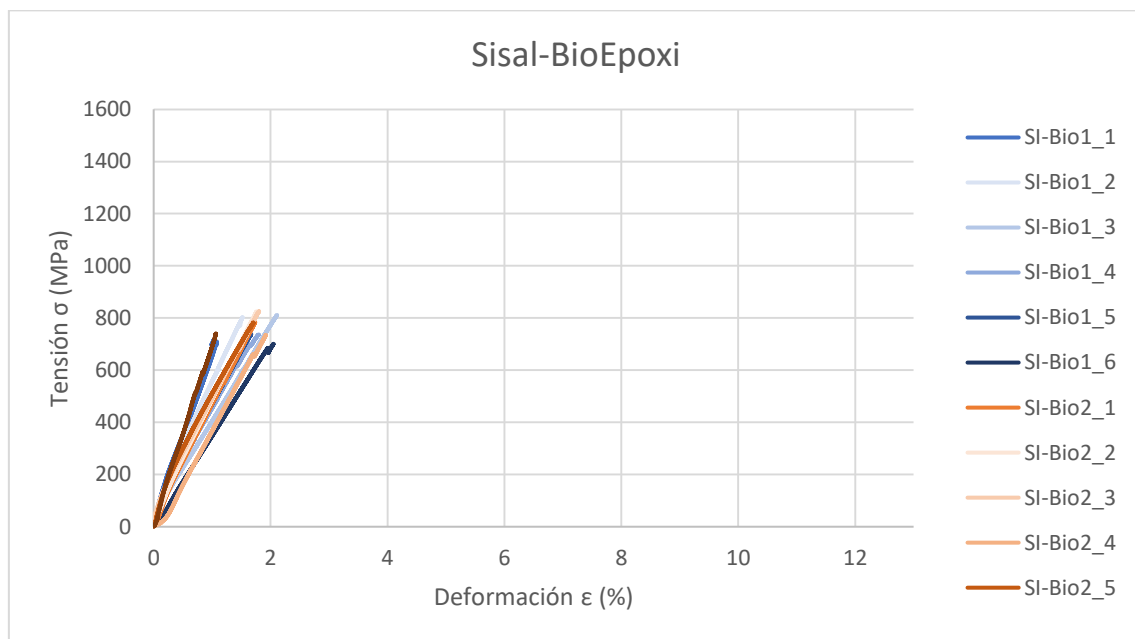


FIG. 81: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN SI-BIOEPOXI

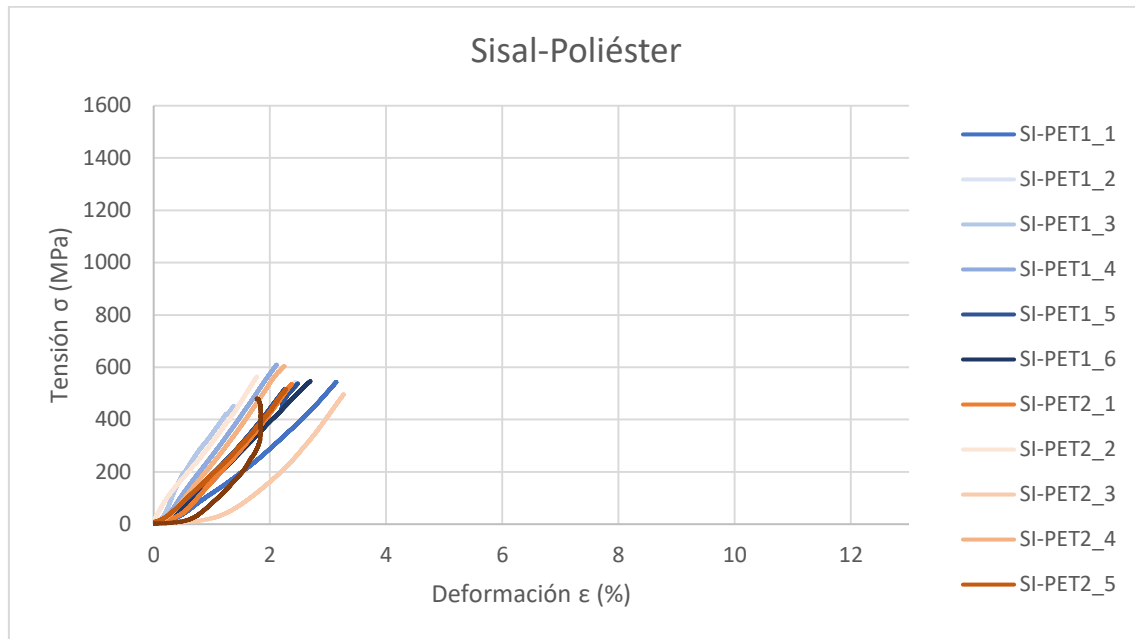


FIG. 82: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN SI-POLIÉSTER

Obtenemos una diferencia importante en el coeficiente de variación en la deformación máxima del segundo tejido en comparación con el primero en la combinación sisal-poliéster visible en la Fig.80.

Si comparamos la Fig. 78 y la Fig. 79 son bastante parecidas en comportamiento, pero observamos el punto de rotura de las curvas podemos ver que la deformación máxima en la rotura en el caso de la resina Bio-Epoxi es más variable y en cambio con la resina Epoxi el rango de deformaciones máximas es más estrecho.

3.3.5. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LAS RESINAS APLICADAS

En este apartado consideramos solo el primer módulo de elasticidad del algodón porque es la pendiente del primer tramo de su curva tensión-deformación.

TABLA 31: PROPIEDADES MECÁNICAS MALLAS TRATADAS CON EPOXI

		E1 Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E1 Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Algodón	\bar{X} :	270,003	480,003	5,823	113,297	442,817	8,699
	S:	41,363	46,922	1,190	23,008	94,637	3,256
	CV (/):	0,153	0,098	0,204	0,203	0,214	0,374
Cáñamo	\bar{X} :	725,985	824,428	1,619	754,003	991,544	1,846
	S:	166,812	159,842	0,487	95,593	49,616	0,371
	CV (/):	0,230	0,194	0,301	0,127	0,050	0,201
Lino	\bar{X} :	837,967	1283,698	1,750	1169,159	1342,625	1,991
	S:	164,896	169,445	0,423	938,704	234,033	0,839
	CV (/):	0,197	0,132	0,242	0,803	0,174	0,422

	\bar{X} :	426,595	772,080	1,715	346,674	756,260	2,162
Sisal	S:	85,014	83,278	0,530	40,552	73,132	0,246
	CV (/):	0,199	0,108	0,309	0,117	0,097	0,114

En la Tabla 31. se comparan las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo a tracción de las mallas de algodón/poliéster, cáñamo, lino y sisal tratadas con Epoxi.

Las mallas que obtienen un mayor módulo de elasticidad son las mallas de lino, las mallas de lino también se pueden ver como obtienen la menor deformación máxima, por tanto, estas serán las más rígidas entre las de la Tabla 31. Después del lino le siguen las mallas de cáñamo en la misma línea. Las mallas de sisal obtienen una tensión máxima que no es tan alta como la del cáñamo y el sisal, pero es mayor a la del algodón.

TABLA 32: PROPIEDADES MECÁNICAS MALLAS TRATADAS CON BIO-EPOXI

		E1 Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E1 Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Algodón	\bar{X} :	356,764	512,646	4,059	359,235	566,100	3,690
	S:	65,009	60,215	1,875	56,204	35,178	0,899
	CV (/):	0,182	0,117	0,462	0,156	0,062	0,244
Cáñamo	\bar{X} :	693,263	803,268	1,630	835,707	881,577	1,493
	S:	86,933	170,691	0,457	166,685	305,860	0,554
	CV (/):	0,125	0,212	0,280	0,199	0,347	0,371
Lino	\bar{X} :	937,211	1258,178	1,441	743,826	1280,566	2,307
	S:	81,594	280,090	0,471	100,106	130,838	0,799
	CV (/):	0,087	0,223	0,327	0,135	0,102	0,346
Sisal	\bar{X} :	431,561	750,660	1,695	461,356	782,130	1,665
	S:	95,166	45,902	0,398	103,103	39,283	0,304
	CV (/):	0,221	0,061	0,235	0,223	0,050	0,183

En la Tabla 32. observamos como las mallas de lino son las que obtienen una tensión de rotura más alta en comparación con el resto. Si comparamos los módulos de elasticidad, vemos que tanto las mallas de lino y cáñamo obtienen una rigidez más alta que las demás. Según si comparamos las mallas del primer tejido de lino y cáñamo o las mallas del segundo tejido de lino y cáñamo obtenemos que en el primer tejido de lino el módulo de elasticidad más alto a la de cáñamo, y para las mallas del segundo tejido el cáñamo obtiene un módulo de elasticidad superior.

TABLA 33: PROPIEDADES MECÁNICAS MALLAS TRATADAS CON RESINA DE POLIÉSTER

		E Tejido 1 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 1 (%)	E Tejido 2 (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (MPa)	$\epsilon_{\text{máx.}}$ Tejido 2 (%)
Algodón	\bar{X} :	151,673	443,177	9,789	131,392	457,965	8,876
	S:	21,744	29,056	1,565	12,002	43,942	2,315
	CV (%):	0,143	0,066	0,160	0,091	0,096	0,261
Cáñamo	\bar{X} :	552,048	697,263	1,596	693,484	633,129	1,553
	S:	104,541	80,340	0,360	161,202	163,202	0,516
	CV (%):	0,189	0,115	0,225	0,232	0,258	0,332
Lino	\bar{X} :	776,603	1111,556	1,868	733,844	1000,835	1,962
	S:	92,503	239,787	0,533	169,645	210,125	0,476
	CV (/):	0,119	0,216	0,286	0,231	0,210	0,243
Sisal	\bar{X} :	263,689	538,879	2,377	267,717	532,570	2,289
	S:	52,157	50,677	0,594	28,451	45,721	0,549
	CV (/):	0,198	0,094	0,250	0,106	0,086	0,240

A partir de la Tabla 33. observamos que la mayor tensión máxima adquirida con el recubrimiento de poliéster son las mallas de lino con diferencia al resto, estas también presentan la mayor rigidez con un módulo elástico superior. Si comparamos el módulo de elasticidad de las mallas de lino con el módulo de elasticidad adquirido por las mallas de cáñamo veremos que estas también son bastante rígidas y no hay tanta diferencia considerando que las mallas del tejido 1 de lino con las mallas del tejido 2 del cáñamo tienen una diferencia de unos 140MPa. Tanto las mallas de sisal como las mallas de algodón presentan la mayor capacidad de deformación, pero la deformación máxima del algodón es considerablemente superior a todas las demás.

Después del análisis de resultados de las diferentes resinas vemos tendencias generales en los resultados de las tablas 31., 32. y 33. Siendo las mallas de algodón poliéster las que presentan una menor rigidez, una mayor capacidad de deformarse por lo cual las mallas de algodón son las más flexibles del grupo teniendo también una tensión de rotura menor que el resto. Este hecho puede ser debido a la presencia del 35% de poliéster en los hilos de algodón proporcionándole una mayor flexibilidad al ser una fibra sintética termoplástica. La flexibilidad del poliéster es mayor al de las fibras vegetales ya que este es más elástico y los procesos de estiraje en su hilatura pueden aumentar esta característica. Este rasgo se ve aumentado cuando recubrimos las mallas de algodón con la resina de poliéster aumentando así su flexibilidad.

La resina de poliéster al ser la más flexible de todas aumenta la flexibilidad de las mallas que recubre, por ese motivo observamos en la Tabla 33. que la tensión de rotura y el módulo de elasticidad se ven disminuidos en comparación a los resultados obtenidos en las Tablas 31. y 32.

Si comparamos la resina epoxi con la resina de poliéster los resultados obtenidos son bastante equiparables a excepción de la deformación de las mallas de algodón del tejido 2 en el recubrimiento con poliéster. En este caso obtenemos un valor bastante alto comparado con los valores de deformación obtenidos en el tejido 1 recubierto con epoxi y a los valores de obtenidos en el recubrimiento con bio-epoxi. Este hecho refleja que las características que otorgan las dos resinas epoxis son muy similares, por tanto, el uso de una u otra quedaría reducidos a motivos económicos y ambientales.

Tanto la resina epoxi como la bio-epoxi son las que proporcionan una mayor rigidez a las mallas y una menor capacidad de deformación, probablemente obtenemos tan buen resultado de rigidez con la fibra de lino porque está de por si sea la más rígida y el recubrimiento aumente sus propiedades. Seguida del lino, está el cáñamo donde también se obtienen buenos resultados de rigidez, pude que el uso para una aplicación donde se solicite una mayor rigidez quede reducida a un factor económico o de disponibilidad entre el lino y el cáñamo.

Las propiedades mecánicas que adquiere el sisal con los tres tipos de resinas están a medio camino entre los resultados obtenidos con las mallas de cáñamo y los resultados de las mallas de algodón, aunque la capacidad de deformación del sisal no es mucho mayor a la del lino o el cáñamo.

CAPÍTULO 4: CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Recubrir las fibras vegetales con resinas procedentes de recursos no renovables puede llegar a enmascarar el objetivo de presentar una alternativa más respetuosa con el medio ambiente en la utilización de fibras vegetales. El uso del recubrimiento con resina de mallas de fibras vegetales afecta a la sostenibilidad, aumenta el coste y presenta toxicidad al trabajar con ella. También la presencia de resina dificulta la reciclabilidad del material ya que los tipos de resinas utilizadas en este trabajo no son reciclables.

Aun así, el uso de estas para el recubrimiento de mallas comerciales para su uso en FRCM es una técnica comúnmente usada. Tanto para mejorar las propiedades mecánicas y la interacción entre las fibras y la matriz [13] como para evitar la degradación de las fibras en la matriz [14]. Aunque justifiquemos su utilización es imprescindible concienciar a todo el sector de la construcción y hacer hincapié hacia la investigación de resinas con un total o mayor porcentaje de componente biológico o su reciclado.

En este proyecto se ha incorporado la resina Bio-Epoxi para poder aportar la sensibilización por la problemática ambiental actual y poder comparar las propiedades mecánicas que presentan las fibras vegetales recubiertas de esta resina Bio-Epoxi con las resinas más comunes como la Epoxi sin componente biológico y la resina de poliéster.

También mencionar la problemática actual del algodón [15], con una tasa de producción de 25 millones de toneladas anuales el 95% de su cultivo no es sostenible y es uno de los principales cultivos de Organismo Genéticamente Modificado. Los cultivos de algodón consumen el 25% de la producción de pesticidas y para la producción de 1kg de fibra natural de algodón se necesitan entre 10.000 y 17.000 litros de agua [16]. Su sobreexplotación de consumo de agua es tan elevada que ha contribuido a la desaparición del Mar de Aral en Asia Central.

De este modo a parte del uso de fibras vegetales es conveniente mirar la procedencia de la materia prima e intentar fomentar fibras vegetales de cultivo orgánico y sostenible.

CAPÍTULO 5: PRESUPUESTO

El presupuesto detallado de este proyecto se encuentra en el Documento 2. Presupuesto donde se detallan los costes directos asociados a los recursos humanos, el coste de materiales y recursos utilizados en el trabajo.

El coste total del Trabajo Final de Grado asciende a **VEINTIDÓS MIL SEISCIENTOS SESENTA Y SIETE CON SESENTA Y NUEVE EUROS (22.667,69€)**.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

En este proyecto se han caracterizado geométricamente hilos de algodón, cáñamo, lino y sisal. Se ha desarrollado un sistema experimental para la fabricación de mallas textiles a partir de los hilos mencionados, estas mallas se han recubierto de resina epoxi, bio-epoxi y poliéster haciendo dos tejidos de todas las combinaciones. Resultaron un total de 144, estas se sometieron a un ensayo de tracción y con el análisis de los resultados obtenidos se derivan las siguientes conclusiones:

- Los hilos de algodón tenían un 25% de fibras de poliéster. El objetivo principal de este trabajo era comparar diferentes fibras vegetales sin incluir ninguna fibra sintética. Los hilos que se compraron como hilos de algodón 100% estaban mal etiquetados y resultaron tener poliéster. Se realizó una marcha analítica para determinar que fibra era.
- Los hilos con mayor diferencia de áreas transversales son los hilos de algodón/poliéster y sisal. En la caracterización de los hilos, los de algodón/poliéster y sisal presentaron una diferencia mayor en el área. Debido a la estructura de trenzado del algodón y la torsión de la cuerda del hilo de sisal. Los hilos usados en el estudio son hilos de fibras bastas y por ese motivo presentan más irregularidades.
- Elegimos medir las deformaciones con un extensómetro para mayor precisión. En el ensayo de tracción en lugar de medir las deformaciones con el puente de la prensa electromecánica se decidió usar un extensómetro para mayor precisión. Desde la garra de la prensa hasta el puente hay muchas uniones que pueden desviarnos de la medida real de la deformación sufrida.
- Clasificación de las roturas en las mallas. Después del ensayo a tracción se observó que la mayoría de las roturas en las mallas se podían clasificar. Se clasificaron según el lugar de la rotura siendo la rotura en la sujeción como en el caso las mallas algodón con bio-epoxi, rotura localizada o deslocalizada como las mallas de cáñamo, o bien según la repartición de la tensión en la malla. Los mechones de la malla podían cargar por igual o unos mechones cargaban más que otros.

- La rotura de las mallas es frágil. Las resinas, unas en mayor medida que otras, aumentan el módulo elástico de las mallas y estas al romper lo hacen de forma frágil. No obtuvimos zona plástica en los gráficos tensión-deformación.
- La resina epoxi y bio-epoxi son equiparables. Las dos son resinas rígidas que aportan un aumento del módulo elástico y la tensión de rotura, disminuyendo la deformación máxima de las mallas. En algunos casos como en las mallas de algodón/poliéster, la resina bio-epoxi tenía resultado más rígido y en el caso del cáñamo, lino y sisal daba un resultado menos rígido que la resina epoxi. Pero las diferencias son tan pequeñas que la decisión de usar una u otra será por motivos económicos o medioambientales.
- Las resinas epoxi y bio-epoxi aportan rigidez en todos los casos. Tanto la resina epoxi como la resina bio-epoxi son resinas rígidas, esto radica en el aumento del módulo elástico y de la tensión máxima. La utilización de estas dos resinas será adecuada para estructuras que necesiten un aporte extra de rigidez, como para vigas de hormigón armado y que su flecha sea grande y necesiten aumentar la capacidad de servicio.
- La resina de poliéster proporciona mayores deformaciones en las mallas. La resina de poliéster es una resina flexible, las mallas recubiertas por esta resina obtienen una deformación máxima mayor que con las resinas epoxi y bio-epoxi. Esta característica se buscará para refuerzos que necesiten dar flexibilidad a la estructura. Las mallas recubiertas de resina de poliéster permitirán disipar energía a elementos estructurales sometidos a carga cíclicas.
- Las mallas de cáñamo y lino presentan un comportamiento muy similar. Tanto las mallas de cáñamo y lino sufren el mismo comportamiento en la curva de tensión-deformación con todos los recubrimientos.
- Las mallas de lino son las que presentan más rigidez. En todos los casos las mallas de lino presentan un módulo de elasticidad y una tensión máxima mayores al resto de mallas de las demás fibras.

CAPÍTULO 7: TRABAJO FUTURO

Después de realizar el estudio mecánico de mallas textiles vegetales para el refuerzo de estructuras sería enriquecedor poder avanzar sobre estas líneas de investigación:

- Estudiar la adherencia del refuerzo de mortero y las mallas textiles vegetales en vigas de hormigón.
- Estudiar cómo afecta las características físicas de las mallas en su interacción con el mortero como la densidad de malla y el espesor del tejido entre otras.
- Búsqueda de resinas y recubrimientos alternativos a las resinas comunes con son la resina epoxi y la resina de poliéster procedentes de fuentes no renovables.
- Determinar el óptimo porcentaje de impregnación del recubrimiento para cada tejido.
- Estudio de la respuesta dinámica de bigas reforzadas con mallas textiles vegetales, analizar numéricamente la influencia teórica del refuerzo de bigas de hormigón armado con FRCM vegetal sobre la respuesta vibracional.
- Estudio mecánico de mallas textiles híbridas vegetales y sintéticas para el refuerzo de estructuras a fin de completar este estudio para ver la influencia de las fibras sintéticas en las propiedades mecánicas

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Codispoti, D. V. Oliveira, R. S. Olivito, P. B. Lourenço, and R. Fangueiro, "Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry," *Compos. Part B Eng.*, vol. 77, pp. 74–83, 2015.
- [2] Y. Shireesha and G. Nandipati, "State of Art Review on Natural Fibers," *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 15–24, 2019.
- [3] H. yan Cheung, M. po Ho, K. tak Lau, F. Cardona, and D. Hui, "Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 7, pp. 655–663, 2009.
- [4] Y. Deaquiz and B. Moreno, "Producción y biosíntesis de fibras vegetales," *Conex. Agropecu.*, vol. 6, pp. 29–42, 2016.
- [5] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, "Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003.
- [6] J. Flynn, A. Amiri, and C. Ulven, "Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance," *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 21–29, 2016.
- [7] P. Pandey, D. Bajwa, C. Ulven, and S. Bajwa, "Influence of hybridizing flax and hemp-agave fibers with glass fiber as reinforcement in a polyurethane composite," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 5, 2016.
- [8] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015.
- [9] L. E. Mercedes Cedeño, "Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales," 2019.
- [10] H. Ahmad and M. Fan, "Interfacial properties and structural performance of resin-coated natural fibre rebars within cementitious matrices," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 87, pp. 44–52, 2018.
- [11] C. Escrig, L. Gil, E. Bernat-Maso, and F. Puigvert, "Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 248–260, 2015.
- [12] E.-I. 13934-1/2, "Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method," 2013.
- [13] J. Donnini and V. Corinaldesi, "Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 565–575, 2017.
- [14] F. Micelli and M. A. Aiello, "Residual tensile strength of dry and impregnated

reinforcement fibres after exposure to alkaline environments,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, pp. 490–501, 2019.

- [15] “Algodón: el cultivo más contaminante del mundo: 9 razones para usar algodón orgánico.” [Online]. Available: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/07/27/algodon-el-cultivo-mas-contaminante-del-mundo-9-razones-para-usar-algodon-organico/>. [Accessed: 10-Jan-2020].
- [16] “Nuevos datos sobre el consumo de agua del algodón | Ester Xicota.” [Online]. Available: <https://www.esterxicota.com/revision-consumo-de-agua-del-algodon/>. [Accessed: 10-Jan-2020].